

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

Par
Mohamed Amine Noui

Conception d'un système électrothermique isolé de
protection contre le givre atmosphérique d'une pale
d'éolienne

Janvier 2014

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	ii
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	ix
RÉSUMÉ	x
REMERCIEMENTS.....	xii
Chapitre 1	13
INTRODUCTION.....	13
1.1 Développement de l'énergie éolienne au Québec	13
1.2 Le givrage.....	14
1.3 Les types de glace dans les climats froids	15
1.3.1 Le givre.....	15
1.3.2 Le verglas.....	15
1.3.3 La gelée.....	16
1.3.4 La neige mouillée.....	16
1.4 L'effet du givre sur les éoliennes	16
1.5 Les systèmes de dégivrage	18
1.5.1 Le revêtement des pales.....	18
1.5.2 Le dégivrage pneumatique.....	19
1.5.3 Le dégivrage par micro-ondes	20
1.5.4 Le dégivrage électrothermique	21
1.6 Objectifs et méthodologie.....	22

1.6.1 La nécessité d'une telle étude	22
1.6.2 Objectif	23
1.6.3 Méthodologie	23
Chapitre 2	24
RÉALISATION DES ESSAIS	24
2.1 Réalisation du profil NACA 63-415.....	24
2.1.1 Fabrication	24
2.1.2 Points de mesure des températures et calcul des flux de chaleur	25
2.2 Matériel à disposition pour les essais	28
2.2.1 Soufflerie réfrigérée du LIMA.....	28
2.2.2 Rampe de gicleurs.....	29
2.2.3 Logiciel d'utilisation de la soufflerie (soufflerie 2000).....	30
2.3 Montage expérimental	31
2.4 Procédure expérimentale	32
2.5 Les conditions de givrage.....	35
Chapitre 3	36
RÉSULTATS DES ESSAIS	36
3.1 Programme d'essais.....	36
3.2 Résultats des essais sur profil chauffé sans isolation	37
3.2.1 Profil W0 sans isolation.....	37
3.2.2 Températures enregistrées pendant les essais.....	37
3.2.3 Moyennes des températures enregistrées avec le profil W0.....	40
3.2.4 Observation de la glace formée à l'extrados.....	45

3.3 Résultats des essais sur profil chauffé avec isolation en polyéthylène	49
3.3.1 Profil PL avec isolation de Polyéthylène.....	49
3.3.2 Températures enregistrées pendant les essais.....	49
3.3.3 Moyennes des températures enregistrées pendant les essais sur le profil PL52	
3.3.4 Observation de la glace formée sur l'extrados.....	55
3.4 Résultats des essais sur profil TF avec isolation de téflon	58
3.4.1 Températures enregistrées pendant les essais.....	58
3.4.2 Moyennes des températures enregistrées pendant les essais sur le profil TF61	
3.4.3 Observation de la glace formée sur l'extrados.....	63
3.5 Résultats des essais avec le profil HY recouvert d'une peinture hydrophobe ..	67
3.5.1 Profil d'essai HY	67
3.5.2 Températures enregistrées pendant les essais.....	67
3.5.3 Moyennes des températures enregistrées pendant les essais sur le profil HY70	
3.5.4 Observation de la glace formée sur l'extrados.....	73
Chapitre 4	76
BILAN DES RESULTATS	76
4.1 Description du phénomène.....	76
4.2 L'effet des isolants sur la puissance disponible	77
4.2.1 Puissance de chauffage avec le profil PL	77
4.2.2 Répartition de la puissance avec le profil PL isolé de polyéthylène	79
4.2.3 Répartition de la puissance avec le profil TF	80
4.2.4 Répartition de la puissance avec le profil HY traité d'une peinture hydrophobe	
82	
4.3 Discussion.....	85

CONCLUSIONS	90
RECOMMANDATIONS.....	92
RÉFÉRENCES.....	93
Annexe A : documentation technique sur la fibre de verre	94
Annexe B : la soufflerie du LIMA	98
Annexe C : fiches d’essais.....	99

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1. Évènement de givrage sur l'aile d'un avion [3]	14
Figure 1-2. Cristaux de givre [4]	15
Figure 1-3. Verglas déposé sur des branches d'arbre [5]	16
Figure 1-4. Courbe de puissance calculée pour une éolienne de 600 kW à décrochage aérodynamique [9]	18
Figure 1-5. Champ éolien avec des pales à revêtement glaciophobe [10].....	19
Figure 1-6. Système de dégivrage pneumatique [11]	20
Figure 1-7. Coupe longitudinale du bord d'attaque d'une aile d'avion contenant le système à micro-ondes [12]	21
Figure 1-8. Profil de pale d'éolienne pourvue d'un système électrothermique.....	22
Figure 2-1. Profil NACA 63-415 réalisé au LIMA	25
Figure 2-2. Position des six thermocouples	26
Figure 2-3. Profil final réalisé.....	27
Figure 2-4. Section d'essai de la soufflerie réfrigérée du LIMA.....	29
Figure 2-5. Rampe de gicleur	29
Figure 2-6. Système de mesure des débits d'air et d'eau des gicleurs.....	30
Figure 2-7. Panneau de contrôle de l'échangeur de chaleur et de la rampe de gicleurs	30
Figure 2-8. Interface d'utilisation du logiciel de contrôle de la soufflerie	31
Figure 2-9. Schéma électrique du montage expérimental.....	31
Figure 2-10. Montage expérimental réel.....	32
Figure 2-11. Profil W0 installé dans la section d'essai.....	32
Figure 2-12. Profil W0 pendant le processus d'accumulation de glace.....	33
Figure 2-13. Exemple de températures enregistrées pendant un essai	34
Figure 3-1. Profil W0 sans isolation	37
Figure 3-2. Températures enregistrées avec le profil W0 lors de l'essai n° 1	38
Figure 3-3. Températures enregistrées avec le profil W0 lors de l'essai n° 2.....	38
Figure 3-4. Températures enregistrées avec le profil W0 lors de l'essai n° 3.....	39

Figure 3-5. Températures enregistrées avec le profil W0 lors de l'essai n° 4.....	39
Figure 3-6. Photo du profil W0 chauffé au terme de l'essai n° 1 ($V = 21 \text{ m/s}$; $T = -5^{\circ}\text{C}$) ..	45
Figure 3-7. Photo du profil W0 chauffé au terme de l'essai n° 2 ($V = 21 \text{ m/s}$; $T = -20^{\circ}$)...	46
Figure 3-8. Photo du profil W0 chauffé au terme de l'essai n° 3 ($V = 33 \text{ m/s}$; $T = -5^{\circ}$).....	47
Figure 3-9. Photo du profil W0 chauffé au terme de l'essai n° 4 ($V = 33 \text{ m/s}$; $T = -20^{\circ}$)...	48
Figure 3-10. Schéma du profil d'essai PL	49
Figure 3-11. Températures enregistrées avec le profil PL lors de l'essai n° 5	50
Figure 3-12. Températures enregistrées avec le profil PL lors de l'essai n° 6	50
Figure 3-13. Températures enregistrées avec le profil PL lors de l'essai n° 7	51
Figure 3-14. Températures enregistrées avec le profil PL lors de l'essai n° 8	51
Figure 3-15. Photo du profil PL lors de l'essai n°5 ($V = 21 \text{ m/s}$; $T = -5^{\circ}$).....	55
Figure 3-16. Photo du profil PL lors de l'essai n°6 ($V = 21 \text{ m/s}$; $T = -20^{\circ}$).....	56
Figure 3-17. Photo du profil PL lors de l'essai n°7 ($V = 33 \text{ m/s}$; $T = -5^{\circ}$).....	56
Figure 3-18. Photo du profil PL lors de l'essai n°8 ($V = 33 \text{ m/s}$; $T = -20^{\circ}$).....	57
Figure 3-19. Schéma du profil d'essai TF	58
Figure 3-20. Températures enregistrées avec le profil TF lors de l'essai n° 9	59
Figure 3-21. Températures enregistrées avec le profil TF lors de l'essai n° 10	59
Figure 3-22. Températures enregistrées avec le profil TF lors de l'essai n° 11	60
Figure 3-23. Températures enregistrées avec le profil TF lors de l'essai n° 12	60
Figure 3-24. Photo du profil TF lors de l'essai n° 9 ($V = 21 \text{ m/s}$; $T = -5^{\circ}$).....	64
Figure 3-25. Photo du profil TF lors de l'essai n° 10 ($V = 21 \text{ m/s}$; $T = -20^{\circ}$).....	65
Figure 3-26. Photo du profil TF lors de l'essai n° 11 ($V = 33 \text{ m/s}$; $T = -5^{\circ}$).....	65
Figure 3-27. Photo du profil TF lors de l'essai n° 12 ($V = 33 \text{ m/s}$; $T = -20^{\circ}$).....	66
Figure 3-28. Températures enregistrées avec le profil HY lors de l'essai n° 13	68
Figure 3-29. Températures enregistrées avec le profil HY lors de l'essai n° 14	68
Figure 3-30. Températures enregistrées avec le profil HY lors de l'essai n° 15	69
Figure 3-31. Températures enregistrées avec le profil HY lors de l'essai n° 16	69
Figure 3-32. Profil HY (essai n° 13 : 122 W) à droite, et profil PL (essai n° 5 : 123 W) à gauche	73

Figure 3-33. Profil HY (essai n° 14 : 152 W) à droite, et profil PL (essai n° 6 : 154 W) à gauche	73
Figure 3-34. Profil HY (essai n° 15 : 153 W) à droite, et profil PL (essai n° 7 : 161 W) à gauche	74
Figure 3-35. Profil HY (essai n° 16 : 186 W) à droite, et profil PL (essai n° 8 : 204 W) à gauche	75
Figure 4-1. Représentation des puissances sur le profil.....	76
Figure 4-2. Histogramme du comportement de la puissance sans isolation.....	78
Figure 4-3. Répartition de la puissance avec une isolation en polyéthylène	80
Figure 4-4. Répartition de la puissance avec une isolation en téflon	81
Figure 4-5. Répartition de la puissance avec une isolation en polyéthylène et une peinture hydrophobe	84
Figure 4-6. La puissance intérieure en fonction de la résistance thermique pour les trois essais	86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Moyennes des températures enregistrées du profil W0 lors de l'essai n° 1	40
Tableau 2. Moyennes des températures enregistrées du profil W0 lors de l'essai n° 2	40
Tableau 3. Moyennes des températures enregistrées du profil W0 lors de l'essai n° 3	41
Tableau 4. Moyennes des températures enregistrées du profil W0 lors de l'essai n° 4	41
Tableau 5. Puissance (Watt) entrant dans le profil W0 chauffé à l'extrados P_E et à l'intrados P_I	44
Tableau 6. Moyennes des températures enregistrées du profil PL lors de l'essai n° 5	52
Tableau 7. Moyennes des températures enregistrées du profil PL lors de l'essai n° 6	52
Tableau 8. Moyennes des températures enregistrées du profil PL lors de l'essai n° 7	52
Tableau 9. Moyennes des températures enregistrées du profil PL lors de l'essai n° 8	53
Tableau 10. Moyennes des températures enregistrées du profil TF lors de l'essai n° 9	61
Tableau 11. Moyennes des températures enregistrées du profil TF lors de l'essai n° 10	61
Tableau 12. Moyennes des températures enregistrées du profil TF lors de l'essai n° 11	61
Tableau 13. Moyennes des températures enregistrées du profil TF lors de l'essai n° 12	62
Tableau 14. Moyennes des températures enregistrées du profil HY lors de l'essai n° 13	70
Tableau 15. Moyennes des températures enregistrées du profil HY lors de l'essai n° 14	70
Tableau 16. Moyennes des températures enregistrées du profil HY lors de l'essai n° 15	70
Tableau 17. Moyennes des températures enregistrées du profil HY lors de l'essai n° 16	71
Tableau 18. Répartition de la puissance avec le profil W0 pendant le givrage	77
Tableau 19. Répartition de la puissance avec le profil PL pendant le givrage	79
Tableau 20. Répartition de la puissance avec une isolation en téflon	81
Tableau 21. Répartition de la puissance avec une isolation en polyéthylène et une peinture hydrophobe	83
Tableau 22. La puissance intérieure Pint perdue en fonction de la résistance thermique des trois couches isolantes	86
Tableau 23. Épaisseurs des isolants PL et TF en fonction de % Pintperdue	87
Tableau 24. Épaisseurs de polyester et de silice à utiliser afin de réduire Pint	88

RÉSUMÉ

L'objectif de ce mémoire est d'analyser les résultats de 16 essais de givrage effectués avec des profils NACA63-415 représentatifs d'une pale d'éolienne chauffés au bord d'attaque à l'aide d'un système électrothermique opéré en mode antigivrage. Trois profils de fibre de verre de 20 cm de corde et de 30 cm de largeur ont été fabriqués, chacun ayant l'élément chauffant isolé différemment. Le premier servant de référence est isolé seulement par 5 mm de fibre de verre. Les deuxième et troisième sont semblables au premier, l'élément chauffant y étant isolé davantage avec 1 mm de polyéthylène et 1,2 mm de Téflon. Le quatrième est le profil isolé de polyéthylène traité avec une couche de peinture hydrophobe. Le but visé est de réduire via l'utilisation de ces quatre différentes isolations la puissance de chauffage entrant dans le profil et ainsi d'augmenter l'énergie produite par l'éolienne dans des conditions givrantes. Les essais ont comporté deux étapes où les profils fixés à un angle de 6° dans la soufflerie réfrigérée du LIMA sont exposés au vent. La première est effectuée dans l'air sec dont on contrôle la température à l'aide de l'ordinateur jusqu'à ce qu'elle se stabilise aux valeurs cibles de -5 et -15°C . Une fois celles-ci atteintes, on chauffe le bord d'attaque pendant 30 min où la température est maintenue précisément à $41,5^\circ\text{C}$. La seconde étape est celle où les profils ainsi chauffés sont exposés pendant 20 minutes à un flux de gouttelettes surfondues soufflé à 21 et 33 m/s. Ces conditions sont représentatives de celles observées à la station météorologique de Murdochville (Québec). La chaleur entrant dans les profils est calculé à partir de la résistance thermique de chaque profil et des gradients thermiques mesurés à l'extrados et à l'intrados à deux emplacements. En raison du petit nombre d'essais complétés, un seul essai par condition, et du petit nombre des points de mesures de températures restreints à six, les valeurs des puissances calculées présentent une très grande variabilité; la plus forte de $\pm 60\%$ dans le cas du profil isolé de Polyéthylène; et la plus faible de $\pm 12\%$ dans le cas de celui isolé avec le Téflon. Pour cette raison la puissance pénétrant dans l'aile a dû être

considérées d'une façon globale, soit pour chaque profil à partir de la moyenne des valeurs obtenues à l'intrados et à l'extrados dans les quatre conditions simulées. En dépit de ces limitations, la puissance P_{int} entrant dans le profil en fibre de verre représente en moyenne 42% de la puissance fournie par l'élément chauffant. Avec les profils isolés avec 1,2 mm de polyéthylène et de 1,0 mm de téflon, les puissances P_{int} y entrant diminuent en moyenne à 33% et 25% de la puissance totale de chauffage. Il est possible d'utiliser ces résultats pour déterminer le niveau d'isolation que doit présenter une pale d'éolienne ou d'hélicoptère, et même une aile d'avion, de façon à répartir efficacement la puissance de chauffage. Quant au recouvrement hydrophobe, il semble rendre le dégagement des parties chauffées plus efficace comparativement au même profil non traité exposé aux mêmes conditions de glace.

REMERCIEMENTS

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail de recherche dans les meilleures conditions.

Je tiens à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance envers mon directeur de recherche, monsieur Jean Perron, professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi, pour son soutien moral et matériel, ses conseils enrichissants et ses remarques pertinentes qui ont été pour moi une aide précieuse.

Mes sincères remerciements à mon codirecteur, monsieur Jean-Louis Laforte, professeur au département des sciences appliquées à l'Université du Québec à Chicoutimi, qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce projet, malgré ses engagements professionnels. Son orientation judicieuse et son engagement sincère m'ont permis d'avoir un encadrement remarquable pour l'accomplissement de mon projet.

J'exprime ma profonde reconnaissance à mes chers parents, mon oncle et mon cher frère pour tous leurs sacrifices et leur patience, pour la peine qu'ils se sont donnée à me guider et me soutenir même dans les circonstances les plus difficiles.

Mes plus sincères sentiments à mon épouse pour son soutien, son sacrifice et son encouragement durant toute la période de la réalisation de ce travail.

Je remercie finalement tous les membres du LIMA avec lesquels nous avons partagé des moments inoubliables et une ambiance de travail exceptionnelle. Je les remercie pour leur aide et leur appui.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Développement de l'énergie éolienne au Québec

D'après le ministère des Ressources naturelles et de la Faune, le Québec aurait un potentiel éolien exploitable de 3 984 322 MW [1], soit près de 100 fois la puissance de l'ensemble des centrales hydrauliques. Or le Québec a l'avantage de bénéficier d'une énergie de base abondante et modulable; pour répondre à ses besoins, il dispose d'une énergie hydroélectrique abondante, qu'il peut coupler à l'énergie éolienne par l'intermédiaire d'un réseau fiable et équilibré. L'énergie éolienne s'avère ainsi un excellent complément à l'hydroélectricité.

La principale limite au développement du potentiel éolien du Québec est le climat très froid qui provoque des problèmes de givrage, ainsi que l'intégration à peu de frais de cette nouvelle production au réseau électrique actuel.

Les succès de l'énergie éolienne observés à la fin des années 1990 au Danemark et en Allemagne, notamment, les difficultés économiques de la Gaspésie et la pression croissante des écologistes ont poussé le gouvernement du Québec à lancer en 2003 un premier appel d'offres de 1000 MW d'énergie éolienne auprès d'investisseurs privés. Hydro-Québec estime que 1000 MW d'installations éoliennes produisent l'énergie

consommée par environ 160 000 maisons. Cet appel d'offre était destiné exclusivement à la région de la Gaspésie et à la municipalité régionale de comté (MRC) de Matane.

Le succès de cet appel d'offres étonna la direction d'Hydro-Québec, des projets pour près de 4000 MW [1] ont été déposés et le coût des projets retenus était inférieur aux prévisions.

1.2 Le givrage

Le givrage (figure 1-1) se produit lorsqu'un objet est exposé à l'air très humide et/ou contenant des gouttelettes d'eau en surfusion. De telles conditions se trouvent dans les nuages, les brouillards givrants, la neige mouillée, la pluie ou la bruine verglaçante, ou la grêle. Le phénomène de givrage dépend d'un paramètre fondamental, la teneur en eau liquide (LWC). Ce paramètre indique la quantité d'eau liquide contenue dans un volume donné d'air et représente une caractéristique du nombre de gouttelettes d'eau en surfusion présentes dans l'air [2].



Figure 1-1. Évènement de givrage sur l'aile d'un avion [3]

On peut décrire le processus de givrage de la façon suivante : les gouttelettes d'eau en surfusion qui ont une température inférieure à 0°C heurtent la surface de l'objet ou de la glace qui le recouvre. Après impact les gouttelettes d'eau gèlent en raison de la surfusion. Le degré de surfusion influence aussi la forme que prend la gouttelette d'eau surfondue après l'impact. La solidification s'effectue à un taux déterminé dépendamment de la quantité de chaleur latente de solidification qui peut être absorbée par l'air et par le substrat.

1.3 Les types de glace dans les climats froids

1.3.1 Le givre

Le givre (figure 1-2) se produit lorsque la gouttelette d'eau en surfusion se solidifie avant l'arrivée d'une autre gouttelette au même endroit. Lorsque le taux de solidification est suffisant, la température de la surface de glace doit dans ce cas être inférieure à la température de solidification de l'eau [2].



Figure 1-2. Cristaux de givre [4]

1.3.2 Le verglas

Le verglas (figure 1-3) se produit à une température avoisinant la température de solidification de l'eau. Lorsque le taux de solidification n'est pas suffisant, une certaine quantité d'eau peut rester emprisonnée à l'intérieur de la glace lorsqu'une seconde

gouttelette d'eau arrive au même endroit ou demeure sous forme liquide en surface de la glace [2].



Figure 1-3. Verglas déposé sur des branches d'arbre [5]

1.3.3 La gelée

La gelée se forme sur un objet à température inférieure à 0°C par sublimation de la vapeur d'eau contenue dans l'air [2].

1.3.4 La neige mouillée

Lorsque la température de l'air est légèrement supérieure à 0°C , les flocons de neige fusionnent en partie lors de leur descente où ils s'agglomèrent sous l'effet des forces aérodynamiques pour venir heurter la surface de l'objet ou de la glace. La neige mouillée peut occasionner aux éléments structuraux des charges parfois suffisamment importantes pour occasionner leur écrasement.

1.4 L'effet du givre sur les éoliennes

Les conditions climatiques très froides des régions nordiques durant l'hiver affectent d'une façon considérable la performance des éoliennes et ralentissent leur vitesse de rotation lors des journées les plus venteuses. Cela est dû à l'accrétion irrégulière de la glace sur les pales d'éoliennes. Cette charge de glace provoque le déséquilibre de l'éolienne

ainsi que d'importantes vibrations. Par contre, si la charge de la glace est très importante, la structure des pales se déforme complètement. L'accrétion de glace peut également affecter la sécurité publique dans le cas d'un parc éolien situé près d'une route ou d'une place publique, dû à l'éjection de quantités et de masses importantes de glace à des vitesses très élevées [6].

Dans la littérature, l'impact du givrage sur les éoliennes fait l'objet de plusieurs études. Un tel projet a été récemment réalisé au Laboratoire international des matériaux antigivre (LIMA) à l'UQAC [7-8], concernant les effets du givrage sur les propriétés aérodynamiques d'une pale d'éolienne. En effet, des simulations ont été effectuées dans la soufflerie du LIMA sur un profil NACA 63 415 sous deux régimes d'accrétion, l'un sec et l'autre humide, où il a été constaté que la quantité de glace accumulée augmente en fonction de la position radiale. Le résultat des simulations montre aussi qu'avec l'augmentation de la position radiale, pour les deux événements givrants, le coefficient de portance décroît d'environ 25%, alors que le coefficient de traînée augmente considérablement pouvant atteindre jusqu'à 220%.

Rong et Bose [9] ont démontré que même de faibles dépôts peuvent suffisamment modifier la rugosité de surface pour réduire la production d'énergie éolienne d'au moins 20%.

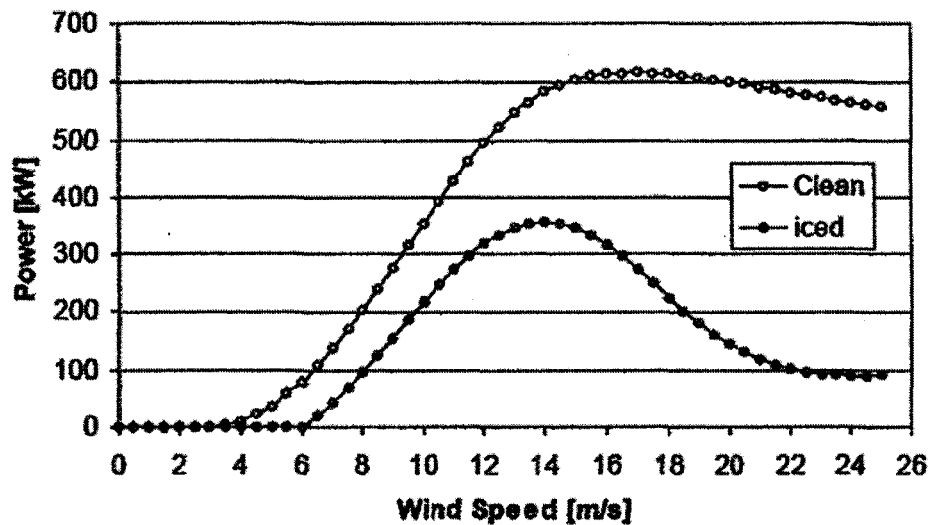


Figure 1-4. Courbe de puissance calculée pour une éolienne de 600 kW à décrochage aérodynamique [9]

Dans la littérature, on trouve plusieurs articles qui évoquent les pertes de puissance d'une éolienne givrée [9]. En effet, à la figure 1-4 on peut voir que la production décroît continuellement à mesure que la quantité de glace formée sur le bord d'attaque augmente. Ces baisses sont significativement plus importantes lorsque la vitesse du vent atteint 14 m/s ou plus.

1.5 Les systèmes de dégivrage

Plusieurs systèmes de dégivrage ont été développés lors de nombreux projets de recherche dans le domaine de givrage des ailes d'avion. L'application de ces systèmes aux pales d'éolienne reste encore à être effectuée; dans le présent projet, le système thermique présenté est déjà appliqué sur des pales d'éolienne.

1.5.1 Le revêtement des pales

Le revêtement des pales d'éolienne est une méthode très utilisée dans l'industrie éolienne; elle consiste à déposer une peinture glaciophobe sur les pales d'éolienne, comme le montre la figure 1-5. Cette peinture de couleur noire aide à prévenir l'accumulation de

glace sur les pales et la couleur noire permet de chauffer la surface des pales par l'effet du rayonnement solaire lors de journées ensoleillées [10].



Figure 1-5. Champ éolien avec des pales à revêtement glaciophobe [10]

Cette méthode n'est pas très efficace dans les régions où le climat froid est très sévère, mais peut très bien compléter une autre méthode de dégivrage.

1.5.2 Le dégivrage pneumatique

Un dégivreur pneumatique (figure 1-6) est un dispositif généralement installé sur le bord d'attaque des ailes d'avion, ces zones étant les plus susceptibles d'accumuler de la glace. Un dégivreur pneumatique comprend une membrane en caoutchouc épais installée sur la surface et, quand la glace s'y accumule, la membrane est gonflée par injection d'air comprimé. L'expansion produite provoque des fissures dans la glace, qui se brise en morceaux et est emportée par le flux d'air. Le système est ensuite dégonflé pour retourner l'aile ou la surface à sa forme initiale.

Il existe beaucoup d'inconvénients avec de tels systèmes. Par exemple, les membranes doivent être remplacées à tous les deux ou trois ans car le caoutchouc se dégrade rapidement sous l'action des rayons UV et des agents atmosphériques [11].

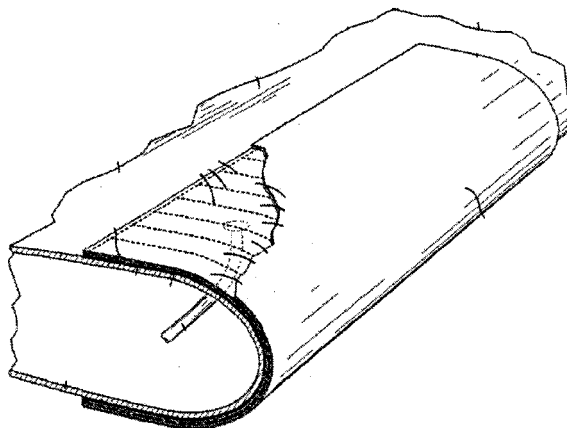


Figure 1-6. Système de dégivrage pneumatique [11]

1.5.3 Le dégivrage par micro-ondes

Le dégivrage par micro-ondes, récemment développé, est utilisé en aviation [12], mais il n'est pas encore appliqué à des pales d'éolienne.

Le système schématisé à la figure 1-7 est constitué d'un tube métallique doté d'un revêtement absorbant. Il est introduit à l'intérieur de l'aile avec une ou plusieurs sources de micro-ondes. L'énergie des radiations micro-ondes est transformée en énergie thermique qui atteint la surface par conduction via le tube métallique [12].

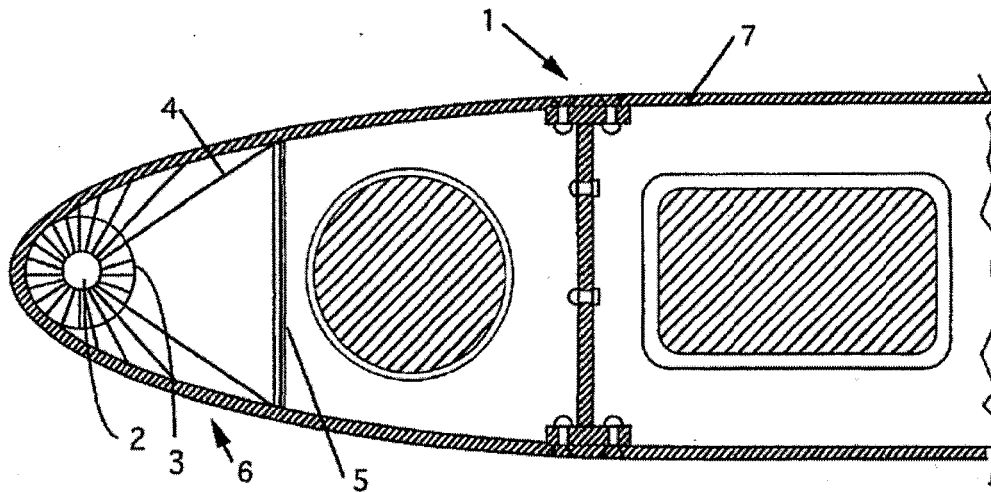


Figure 1-7. Coupe longitudinale du bord d'attaque d'une aile d'avion contenant le système à micro-ondes [12]

La figure montre une coupe transversale du bord d'attaque d'une aile d'avion équipée d'un système de dégivrage par micro-ondes. La source de micro-ondes (2) est entourée d'un tube de propagation (3) placé à proximité du bord d'attaque de l'aile (6). La propagation thermique vers la surface (7) de l'aile se faisant par conduction via le tube métallique (4).

1.5.4 Le dégivrage électrothermique

Ce système consiste à accoler des éléments chauffants sur le bord d'attaque de la pale pour en augmenter la température en surface et prévenir l'accumulation de glace. Avec ce système, la glace s'auto-évacue à l'aide des forces centrifuges générées par la rotation de la pale.

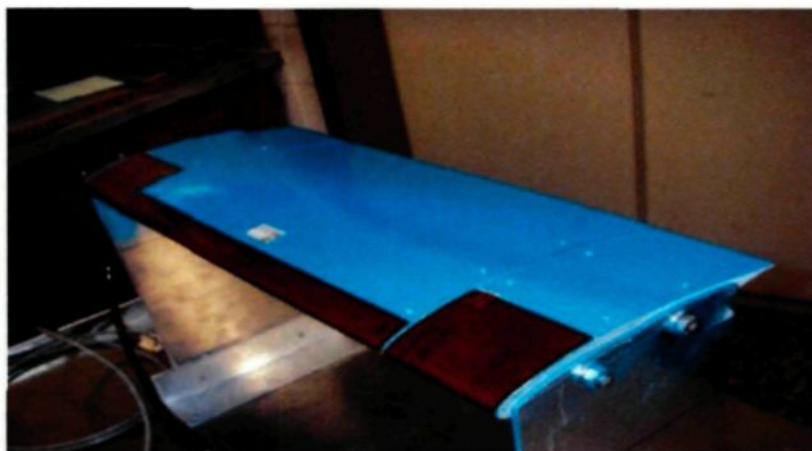


Figure 1-8. Profil de pale d'éolienne pourvue d'un système électrothermique

La figure 1-8 présente un profil de pale (NACA 63-415) développé au LIMA avec le bord d'attaque pourvu d'éléments chauffants.

1.6 Objectifs et méthodologie

1.6.1 La nécessité d'une telle étude

Les systèmes électrothermiques de dégivrage sont les plus utilisés à l'heure actuelle dans le domaine des éoliennes, beaucoup d'études et d'expérimentations ayant été réalisées sur ce sujet. Une de ces études réalisée au LIMA en 2007 a été l'objet d'un mémoire de maîtrise intitulée « Système électrothermique de dégivrage pour une pale d'éolienne : simulation en soufflerie réfrigérée et impact sur la puissance » [8]. Cette étude a été effectuée à l'aide d'un profil de pale chauffé givré en soufflerie réfrigérée afin de démontrer la rentabilité d'intégrer un système électrothermique lors même de la phase de conception d'un parc éolien lorsqu'il y a risque d'être exposé à des conditions givrantes. Une partie du travail a consisté à mesurer la température à l'intérieur du profil avant de la pale afin d'y calculer les pertes d'énergie pendant le processus de dégivrage. Avec un profil à une température interne de 100°C, les pertes ont atteint des températures de l'ordre de centaines de watts. Il est donc important de chercher un moyen de protéger la fibre de verre

qui se dégrade rapidement à ces températures élevées, de même que de diminuer le flux de chaleur interne de la pale tout en maximisant celui en surface, ce qui fait fondre la glace et ainsi permet de gagner en puissance.

1.6.2 Objectif

Le présent projet de recherche fait suite au projet de maîtrise réalisé au LIMA en 2007 [13] qui a permis le développement d'un profil d'aile doté d'un système électrothermique. Il se propose de développer un système électrothermique de dégivrage applicable aux éoliennes dans lequel l'élément chauffant est isolé de la pale. De façon plus spécifique, l'isolant aura pour effets : 1- de protéger la fibre de verre contre les températures élevées du système électrothermique pendant les périodes de chauffage; et 2- de réduire l'énergie entrant dans la pale pendant la phase du dégivrage et ainsi minimiser la puissance consommée par le système électrothermique.

1.6.3 Méthodologie

La réalisation de cet objectif passe par l'élaboration de plusieurs étapes essentielles :

- l'identification des conditions climatiques auxquelles le système électrothermique est exposé, compte tenu de la vitesse de rotation des pales d'éolienne;
- la fabrication de plusieurs profils de pale avec les mêmes matériaux que ceux utilisés dans l'industrie;
- le choix des matériaux isolants à installer entre le profil et les éléments chauffants afin de réduire le flux de chaleur entrant dans la pale et ainsi gagner en puissance;
- l'évaluation de l'efficacité de dégivrage des profils en soufflerie.

CHAPITRE 2

RÉALISATION DES ESSAIS

2.1 Réalisation du profil NACA 63-415

2.1.1 Fabrication

Le profil de pale choisi est celui de l'aile NACA 63-415 (figure 2-1); il s'agit d'un NACA dont les caractéristiques aérodynamiques sont disponibles dans la littérature et qui est couramment utilisé pour la confection des pales d'éoliennes. Pour la fabrication de la section de pale, un moule en bois a d'abord été usiné en deux parties dont le fini de surface intérieure d'une précision de 200 μm a été obtenu après sablage et cirage. Les deux parties intérieures du moule ont ensuite été enduites de deux (2) couches de Gelcoat (enduit gélifié) appliquées au pinceau, ce qui donne au démoulage la couleur blanche à la pièce. Il s'agit d'une peinture à base de résine de polyester à laquelle des pigments et des additifs ont été ajoutés. Elle confère à la pièce son état de surface final. Ce dernier dépend du type de résine de base utilisé, qui est choisi selon le milieu dans lequel sera exposée la pièce. Onze couches de tissu de fibres de verre ont ensuite été placées une par une dans chaque moule et imbibées au pinceau d'un mélange de résine et de catalyseur.

La période de polymérisation de la résine est assez courte. Par souci de sécurité, on laisse sécher les pièces pendant 24 heures avant le démoulage. La forme des pièces (angles

de dépouille importants) ainsi que le soin apporté à la préparation du moule permettent un démoulage aisé.

Le type de Gelcoat utilisé est un Gelcoat ortho-phtalique au néo-penty-glycol. Sa formulation chimique est la suivante : $\text{HOCH}_2\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{OH}$. C'est un produit sensible à l'humidité et soluble à l'eau, au méthanol ou à l'acétone. De plus, il est trop poreux pour être utilisé comme surface extérieure finale. Par conséquent, le profil est peint de trois (3) couches de peinture émail, chimiquement compatible avec le Gelcoat. Une coloration bleue a été retenue pour permettre une meilleure observation visuelle du givre et une meilleure qualité d'image pour les photos. L'épaisseur moyenne finale du profil peint est de 5 ± 1 mm [8].

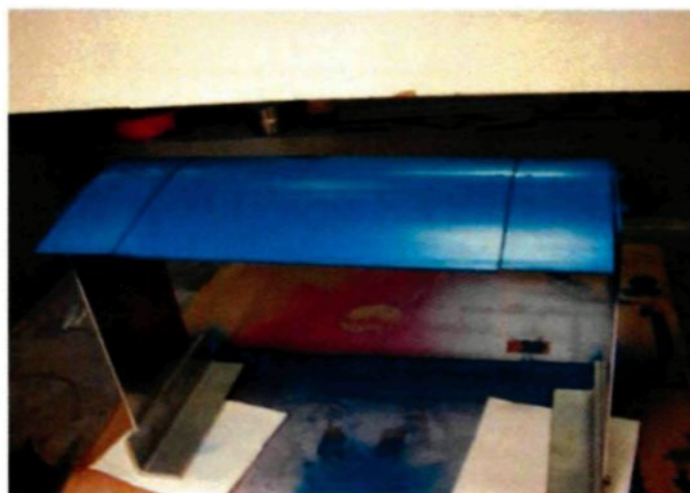


Figure 2-1. Profil NACA 63-415 réalisé au LIMA

2.1.2 Points de mesure des températures et calcul des flux de chaleur

Afin de bien visualiser le flux de chaleur dans les pales et d'enregistrer l'évolution de la température durant l'essai, six thermocouples, trois intérieurs T1, T2, et T3, et trois extérieurs, T4, T5 et T6, ont été placés aux positions montrées à la figure 2-2.

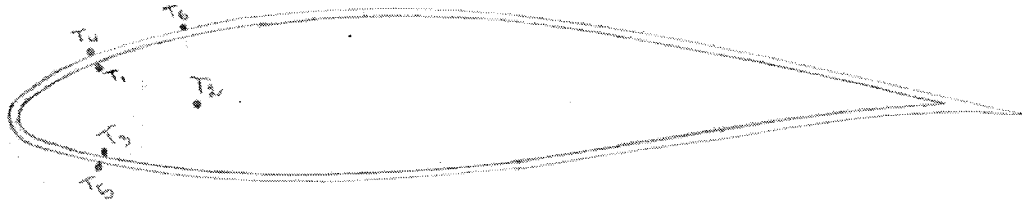


Figure 2-2. Position des six thermocouples

T4 et T1 sont positionnés à 2 mm du nez du profil sur la partie chauffée de l'extrados; ils mesurent respectivement la température au-dessus de l'élément chauffant et celle à l'intérieur sous la fibre de verre. Le senseur au point T4 sert également à ajuster la puissance de chauffage pour obtenir précisément 41,5°C.

T5 et T3 sont situés sur la partie chauffée de l'intrados en-dessous à 4 mm du nez du profil; ils mesurent la température à l'intrados au-dessus de l'élément chauffant et celle sous la fibre de verre à l'intérieur du profil.

T6 est placé à 3 mm au bout de l'élément chauffant, à 6 mm du nez du profil; il mesure la température en surface de la fibre de verre non chauffée de l'extrados.

T2 est placé à 6 mm sur bissectrice du profil dont il mesure la température interne profil.

Les puissances P_{ext} et P_{int} pénétrant à l'intérieur du profil à l'extrados et à l'intrados sont obtenues à partir des flux de chaleurs calculées à partir des gradients de température mesurés à deux endroits dans la condition où elles sont stabilisées, soit entre T4 et T1 pour l'extrados, et entre T5 et T3 pour l'intrados, compte tenu de l'aire des parties chauffées, de la résistance thermique R_{thm} des différentes couches de matériaux d'épaisseurs x_m utilisés pour isoler l'élément chauffant en accord avec les relations suivantes :

$$P_{int} = A_{int} \times \Delta T_{int} / \sum R_{thm} \quad \text{équation 1}$$

$$P_{ext} = A_{ext} \times \Delta T_{ext} / \sum R_{thm} \quad \text{équation 2}$$

où $R_{thm} = k_m / x_m$;

$$A_{\text{ext}} = 2,5 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} = 0,0075 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{int}} = 5,0 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} = 0,015 \text{ m}^2$$

Trois profils ont été construits : le premier profil W0 sert de référence; il est fait d'une couche de fibre de verre épaisse en moyenne de 5 ± 1 mm où le bord d'attaque est recouvert d'un élément chauffant sur une longueur de 5 mm en-dessous à l'intrados et de 2,5 mm au-dessus à l'extrados. L'élément chauffant y est en contact direct avec la fibre de verre. Les deuxième et troisième profils, désignés PL et TE, sont à la base identique au premier, avec la différence que l'élément chauffant est isolé de la fibre de verre par 1,0 et 1,2 mm de polyéthylène et de téflon respectivement. Au terme des essais, le profil PL a été recouvert d'une peinture hydrophobe qui a été alors testé sous la désignation de profil HY.



Figure 2-3. Profil final réalisé

Les profils fabriqués pour les fins de l'étude présentent une corde de 0,2 m (limitée par la hauteur de la section d'essai de la soufflerie utilisée, qui est de 0,6 m), une largeur de 0,5 m (limitée par la largeur de la section d'essai, qui est de 0,5 m) et une épaisseur de

30 mm (limitée par le NACA de profil). La largeur effective du profil utilisé dans les calculs des puissances pénétrant à l'intérieur du profil est de 0,3 m, les deux extrémités étant chauffées sur une plus grande surface sur une longueur de 10 cm de façon à y éviter les perturbations et turbulences occasionnées par la glace (effets de bouts).

Les caractéristiques des matériaux entrant dans la fabrication des profils sont données au Tableau 2.1 ci-dessous. Ces valeurs seront utilisées dans le calcul des résistances thermiques avec et sans givrage.

Tableau 2.1 Caractéristiques des matériaux utilisés pour la fabrication des pales d'éoliennes

Matériaux	Épaisseur	Conductivité thermique	Résistance thermique	Chaleur spécifique	Densité
Fibre de verre	5 mm	1,3 W/(m.K)	0,0038 Km ² /W	0,7 kJ/kgK	2,5g/cm ³
Polyéthylène	1,0 mm	0,37	0,0027	2,3	1,8
Téflon	1,2 mm	0,25	0,0048	1,1	2,2
Fibre de carbone	5 mm	11	0,00045	0,7	1,8
Aluminium	1 mm	222	0,0000045	1,0	2,7

Les caractéristiques de la fibre de graphite et de l'aluminium, deux matériaux utilisés pour la fabrication des pales d'éoliennes, sont également données au Tableau 2-1 pour fin de comparaison.

2.2 Matériel à disposition pour les essais

2.2.1 Soufflerie réfrigérée du LIMA

La soufflerie du LIMA fonctionne en boucle fermée avec recirculation d'air. Sa section d'essai a une longueur de 1,5 m, une largeur de 0,5 m et une hauteur de 0,6 m.



Figure 2-4. Section d'essai de la soufflerie réfrigérée du LIMA

2.2.2 Rampe de gicleurs

Cinq gicleurs sont alignés horizontalement le long d'une rampe (figure 2-5) placée en amont de la section d'essai afin de produire un brouillard givrant surfondu. Chacun de ces gicleurs est alimenté en eau et en air. Cette rampe oscille verticalement pour que les gouttelettes produites couvrent l'ensemble de la section d'essai.

Les gicleurs produisent des gouttelettes de 28 mm de diamètre. Le débit des gicleurs est contrôlé de façon individuelle par cinq débitmètres (figure 2-6). Un panneau de contrôle règle la température de l'échangeur et la fréquence d'oscillation de la rampe (figure 2-7).

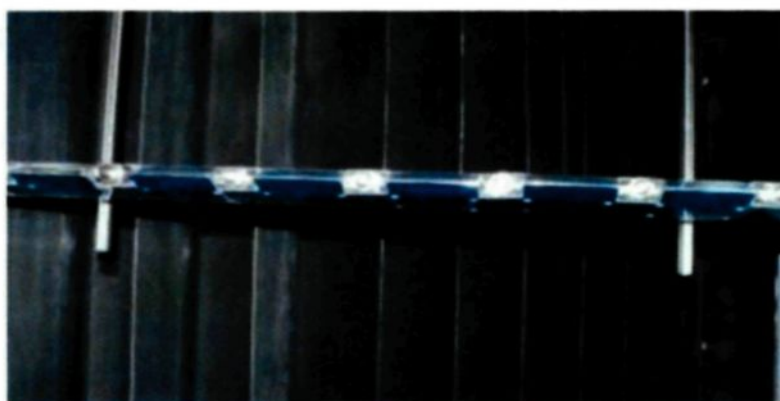


Figure 2-5. Rampe de gicleur



Figure 2-6. Système de mesure des débits d'air et d'eau des gicleurs



Figure 2-7. Panneau de contrôle de l'échangeur de chaleur et de la rampe de gicleurs

2.2.3 Logiciel d'utilisation de la soufflerie (soufflerie 2000)

Ce logiciel, conçu au LIMA, permet l'acquisition et le contrôle de nombreux paramètres d'expérimentation, comme la vitesse de l'air dans la section d'essai, la température, les débits d'air et d'eau de l'alimentation des gicleurs, etc. L'interface d'utilisation de ce logiciel est présentée à la figure 2-8.

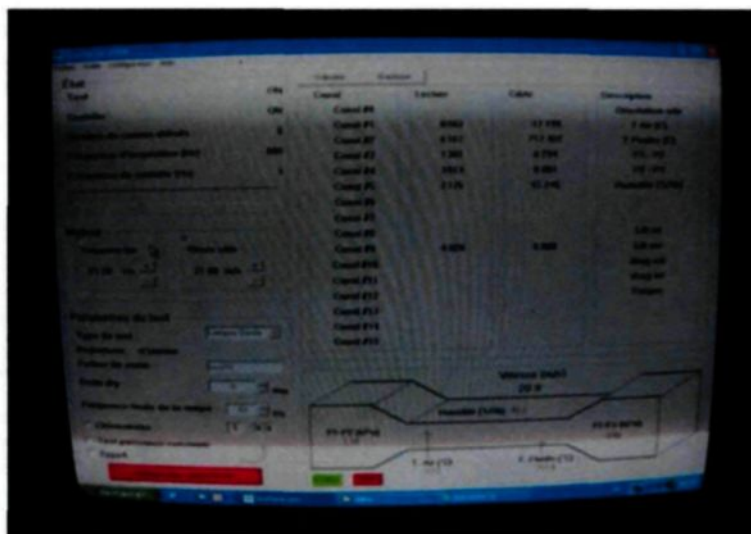


Figure 2-8. Interface d'utilisation du logiciel de contrôle de la soufflerie

2.3 Montage expérimental

Pour les besoins du montage expérimental, un générateur de courant sert à alimenter les éléments chauffants; un voltmètre et un ampèremètre (figure 2-9) mesurent la puissance produite lors du dégivrage. R1 et R2 représentent respectivement l'élément chauffant accolé au bord d'attaque au milieu du profil et les deux éléments chauffants placés aux extrémités.

Les thermocouples sont reliés à un enregistreur de données appelé DATALOGUEUR, qui enregistre les températures dans le profil à six emplacements.

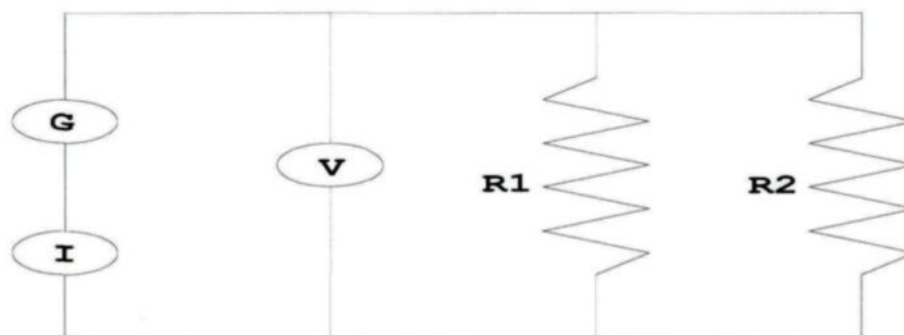


Figure 2-9. Schéma électrique du montage expérimental



Figure 2-10. Montage expérimental réel

2.4 Procédure expérimentale

Après avoir fixé le profil dans la section d'essai à un angle de 6° , ce dernier étant représentatif d'une pale d'éolienne en fonctionnement, on règle la vitesse du vent et la température aux valeurs ciblées à l'aide du logiciel de contrôle et on attend la stabilisation de la température dans la soufflerie.



Figure 2-11. Profil W0 installé dans la section d'essai

On démarre alors la source électrique reliée à l'élément chauffant et on fixe le thermocouple T4 à 41,5°C afin d'éviter l'accumulation de glace sur le bord d'attaque du profil et on attend 30 minutes de façon à obtenir la stabilisation de tous les thermocouples.



Figure 2-12. Profil W0 pendant le processus d'accumulation de glace

Après stabilisation de T4 à 41,5°C, on procède à l'accumulation de la glace pendant 20 minutes. L'enregistrement des données commence au début du chauffage pour se terminer à l'arrêt des gicleurs

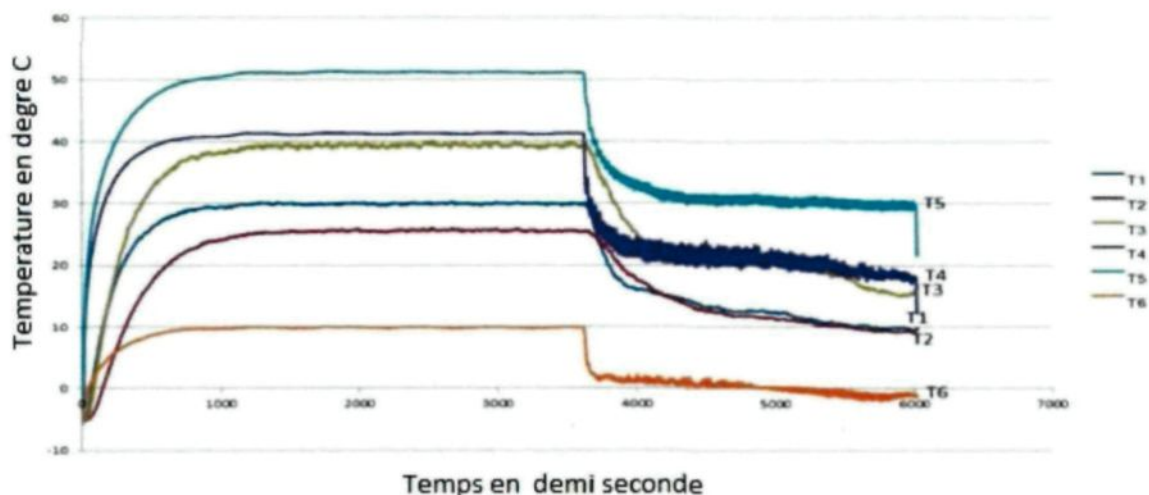


Figure 2-13. Exemple de températures enregistrées pendant un essai

Dans la figure 2-13 on peut voir l'évolution de la température des six thermocouples placés à l'intérieur et à l'extérieur du profil à partir des données enregistrées.

Comme on peut le voir, chaque température suit deux chemins différents: 1. pendant les premières 30 minutes, une montée rapide au moment où l'on commence à alimenter la source; la température monte alors de façon exponentielle jusqu'à la stabilisation; et 2. pendant les 20 minutes où il y a givrage, une chute également exponentielle au moment où l'on démarre l'accumulation de glace; la température diminue alors très rapidement pour se stabiliser de nouveau jusqu'à l'arrêt des gicleurs. Les temps de montée et de descente dépendent principalement de la capacité thermique du matériau dont est fait le profil, dans le cas présent la fibre de verre, et de l'écart de température de l'air par rapport à 41,5°C.

2.5 Les conditions de givrage

Les conditions de givrage aux quelles le profil chauffé est exposé sont présentées au tableau 2.2 :

Tableau 2-2. Les conditions de givrage simulées

Type de glace		Conditions climatiques			
		Vitesse de l'air (m/s)	T_{air} (°C)	LWC (g/m ³)	I (g/m ² .s)
Verglas	C1	21	-5	0,4	5,02
	C2	33	-5	0,4	8,84
Givre	C3	21	-20	0,4	5,02
	C4	33	-20	0,4	8,84

Ces conditions de givrage simulées sont représentatives des événements de givrage qui ont été observés à la station de mesure météorologique de Murdochville en Gaspésie (Québec). L'intensité de givrage I est le produit de la teneur en eau LWC, de la vitesse du vent V et du coefficient de capture des gouttelettes E de 28 μm . Ce dernier est évalué ici à 0,598 et 0,670 aux deux vitesses de vent de 21 et 33 m/s respectivement en assumant que le bord d'attaque est équivalent à un cylindre de 3 cm de diamètre.

La condition où le profil chauffé est soumis à un flux de gouttelettes surfondues est ici la seule représentative de la situation réelle de l'antigivrage, soit celle où une pale tournant dans un brouillard givrant doit être chauffée de façon à y empêcher toute formation de glace. Pour sa part la condition où le profil chauffé tourne dans l'air sec ne correspond pas à la réalité. Dans les faits, en l'absence de précipitation givrante, on n'a pas besoin de chauffage; on ne chauffe pas la pale et il n'y a alors aucune perte d'énergie. La condition de vent sec est utilisée ici comme la condition de référence où on mesure la puissance à fournir pour maintenir le profil à 41,5°C. Les quatre conditions sont présentées au Tableau 2-2 dans l'ordre de croissant de la sévérité du givrage et donc de la puissance de chauffage fournie pour le maintien du bord d'attaque à 41,5°C.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS DES ESSAIS

3.1 Programme d'essais

Le tableau 3-1 ci-dessous présente les paramètres des 16 essais réalisés dans la soufflerie réfrigérée du LIMA, les conditions d'essais étant celles détaillées au Tableau 2-2. La série d'essais comprend quatre (4) expérimentations avec les quatre (4) profils à quatre niveaux croissant de sévérité de givrage comme le montre la puissance croissante requise pour maintenir le bord d'attaque à 41,5°C.

Tableau 3.1 Paramètres des essais complétés

Test	Modèle	Vitesse de l'air m/s	Température de l'air °C	I (g/m ² .s)	Puissance * de chauffage W
1	W0	21	-5	5,02	124,4
2	W0	21	-20	5,02	155,0
3	W0	33	-5	8,84	159,6
4	W0	33	-20	8,84	194,5
5	PL	21	-5	5,02	123,0
6	PL	21	-20	5,02	153,5
7	PL	33	-5	8,84	152,2
8	PL	33	-20	8,84	187,3
9	TF	21	-5	5,02	131,2
10	TF	21	-20	5,02	162,6
11	TF	33	-5	8,84	161,2
12	TF	33	-20	8,84	203,8
13	HY	21	-5	5,02	122,4
14	HY	21	-20	5,02	152,0
15	HY	33	-5	8,84	152,5
16	HY	33	-20	8,84	186,4

*Puissance nécessaire pour maintenir la température à la position T4 à 41,5°C

Les fiches d'essais complètes sont présentées à l'Annexe C.

3.2 Résultats des essais sur profil chauffé sans isolation

3.2.1 Profil W0 sans isolation

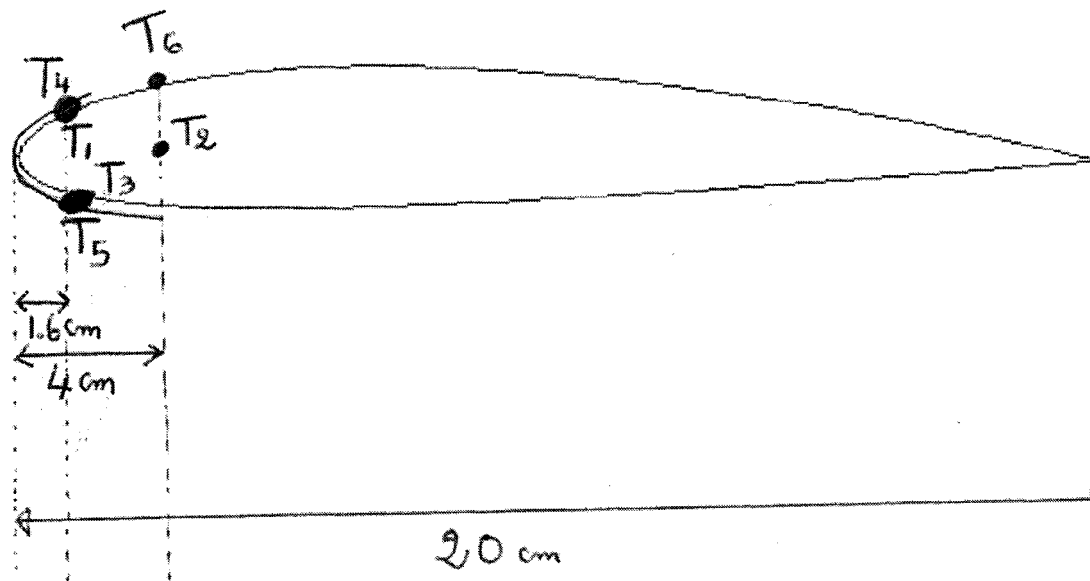


Figure 3-1. Profil W0 sans isolation

3.2.2 Températures enregistrées pendant les essais

L'évolution des six (6) températures mesurées en surface et à l'intérieur du profil pendant le chauffage avant et après le givrage est présentée aux figures 3-2, 3-3, 3-4 et 3-5 pour les quatre (4) conditions de vents et de températures utilisées.

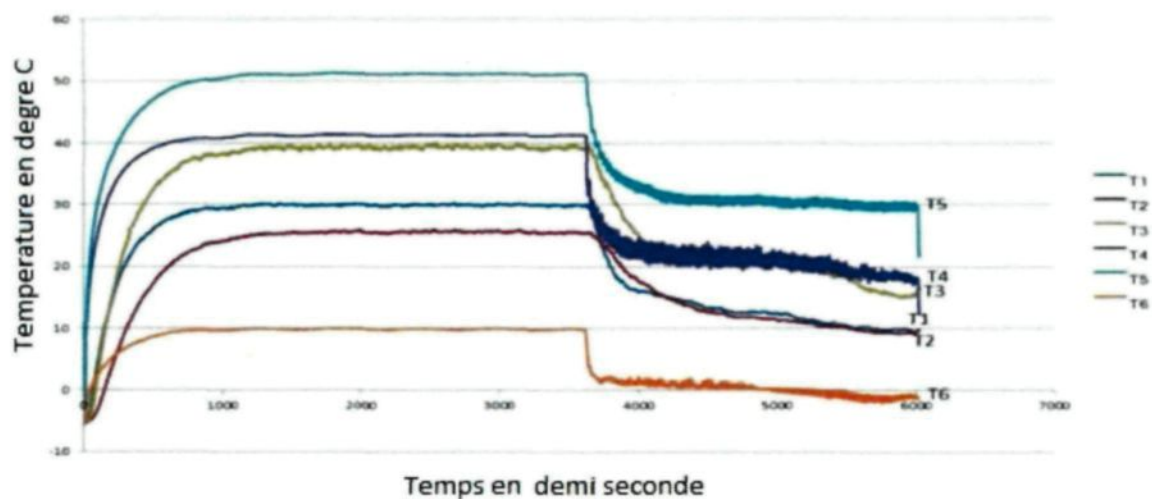


Figure 3-2. Températures enregistrées avec le profil W0 lors de l'essai n° 1

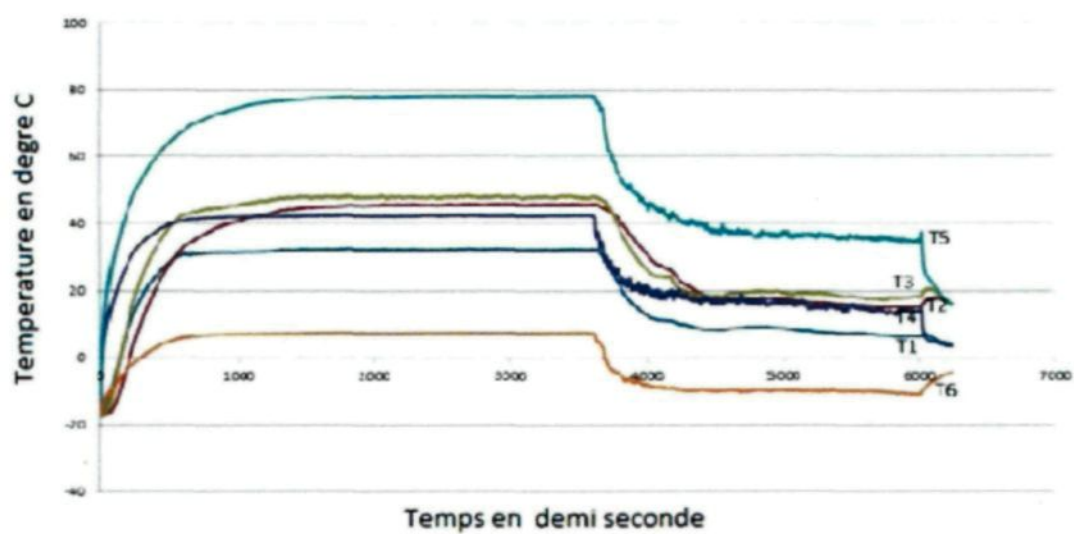


Figure 3-3. Températures enregistrées avec le profil W0 lors de l'essai n° 2

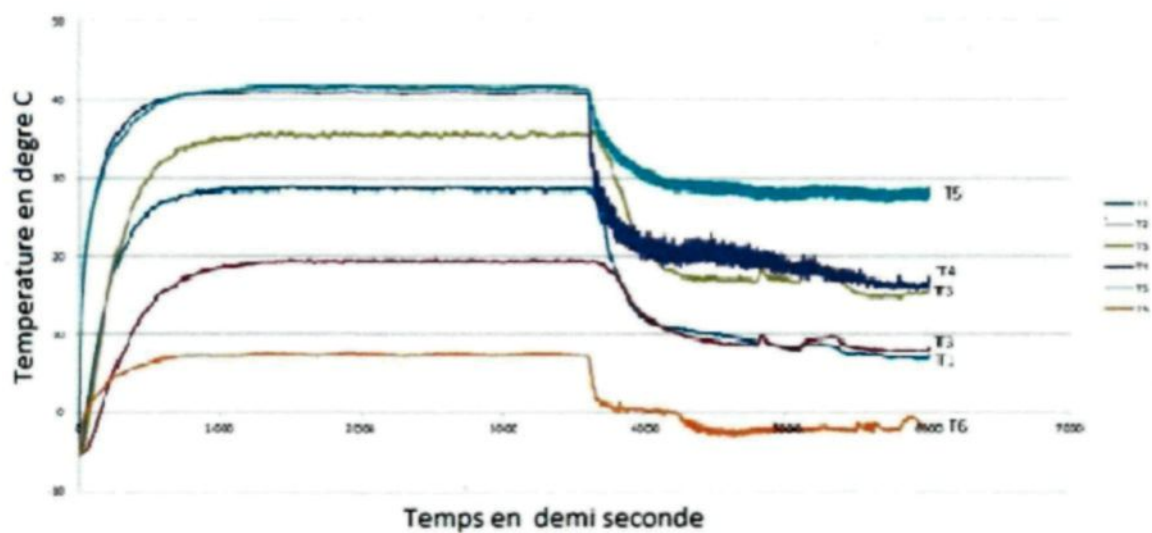


Figure 3-4. Températures enregistrées avec le profil W0 lors de l'essai n° 3

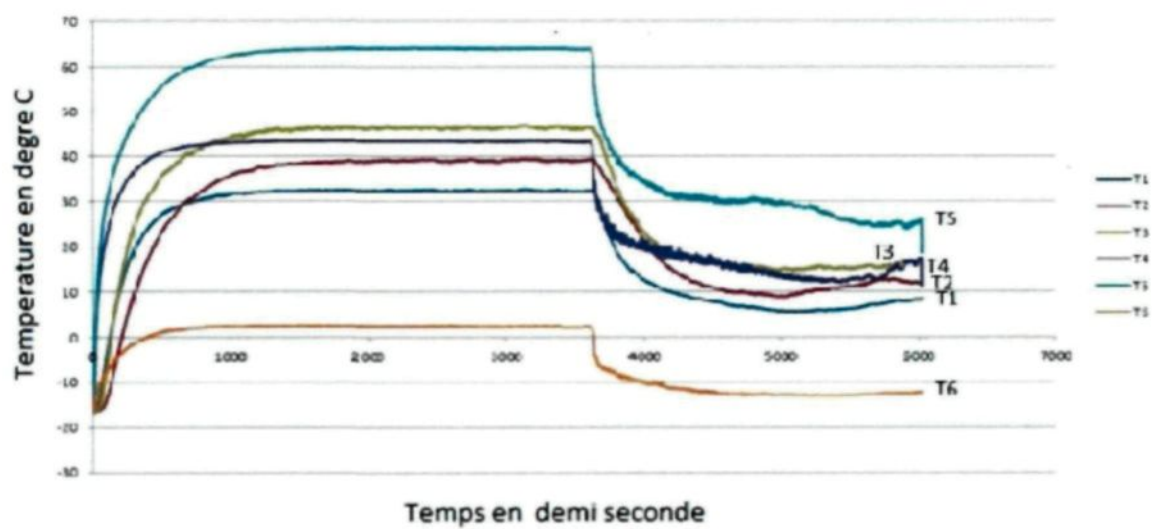


Figure 3-5. Températures enregistrées avec le profil W0 lors de l'essai n° 4

À partir des données enregistrées dans les deux régions où les températures se sont stabilisées ou sensiblement à l'équilibre, on calcule les valeurs moyennes mesurées aux six (6) points de mesure dans les conditions d'avant et pendant le givrage.

3.2.3 Moyennes des températures enregistrées avec le profil W0

Les moyennes des six (6) températures enregistrées à l'équilibre avec le profil W0 dans l'air sec et le givrage dans les quatre (4) conditions d'essais sont présentées aux tableaux ci-dessous, où T2 est la température à l'intérieur du profil et T6 celle à l'extrados à environ 2 cm de l'élément chauffant. Les gradients de température dans la paroi de fibre de verre du profil chauffé à l'extrados ΔT_E et à l'intrados ΔT_I sont également indiqués. Ils sont utilisés pour calculer les flux thermiques et par conséquent la puissance entrant dans le profil à l'équilibre. Les calculs sont détaillés dans les fiches d'essais à l'annexe C.

Tableau 1. Moyennes des températures enregistrées du profil W0 lors de l'essai n° 1

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage °C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage °C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=25,9$				$T_2=12,3$			
$T_6=10$				$T_6=-0,2$			
$T_4=41,3$	$T_1=30,1$	11,2		$T_4=20,5$	$T_1=12,8$	7,7	
$T_5=51,7$	$T_3=39,3$		12,4	$T_5=30,2$	$T_3=19,9$		10,3

Tableau 2. Moyennes des températures enregistrées du profil W0 lors de l'essai n° 2

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=45,2$				$T_2=16,9$			
$T_6=8,4$				$T_6=-10,1$			
$T_4=41,5$	$T_1=31,9$	9,6		$T_4=16,2$	$T_1=10,6$	5,6	
$T_5=78,3$	$T_3=47,6$		30,7	$T_5=37,1$	$T_3=19,2$		17,9

Tableau 3. Moyennes des températures enregistrées du profil W0 lors de l'essai n° 3

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=9,3$				$T_2=8,8$			
$T_6=8,2$				$T_6=-3,6$			
$T_4=41,5$	$T_1=28,7$	12,8		$T_4=18,1$	$T_1=8,3$	9,8	
$T_5=42,1$	$T_3=36,2$		5,9	$T_5=28,3$	$T_3=17,5$		10,8

Tableau 4. Moyennes des températures enregistrées du profil W0 lors de l'essai n° 4

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=39,4$				$T_2=12,1$			
$T_6=2,7$				$T_6=-13,3$			
$T_4=41,5$	$T_1=32,3$	9,2		$T_4=16,1$	$T_1=8,4$	7,7	
$T_5=63,9$	$T_3=46,7$		17,2	$T_5=28,6$	$T_3=16,5$		12,1

On peut donc observer une très grande variabilité dans les données des quatre tableaux précédents, la plus grande étant celle dans l'air sec. Cette grande variabilité influe grandement sur la clarté des observations de même que sur précision des valeurs des flux de chaleur et des puissances calculées à partir des gradients thermiques mesurés. Pour cette raison, on procédera à l'analyse des données obtenues non pas par essai, mais plutôt de façon plus globale à partir de la moyenne des valeurs mesurées et calculées dans les quatre essais

Analyse des données de température

a) Partie non chauffée du profil

Pour les températures à l'intérieur du profil W0 T2, elles sont toutes en haut de 0°C. Dans l'air sec, elles varient entre 9 et 45°C tandis que pendant le givrage elles varient entre 9 et 17°C. Pour les températures T6 sur la partie non chauffée de l'extrados, elles sont positives dans l'air sec, étant comprises entre 3 et 10°C, tandis qu'en condition de givrage elles sont toutes en bas de 0°C, variant entre 0 et -13°C.

Ces valeurs ne suivent pas l'ordre de la sévérité des conditions imposées de refroidissement ou de la puissance croissante qui est fournie pour maintenir T4 à 41,5°C. Dans la condition la moins sévère de l'essai 1, on y a besoin de 125 ± 3 Watts tandis que dans la plus sévère, la puissance fournie atteint 193 ± 5 Watts. On devrait alors s'attendre en effet à ce que les plus faibles valeurs de T2 et T6 soient observées aux conditions de refroidissement les plus grandes dans l'air sec et pendant le givrage, ce qui n'est pas toujours le cas ici en raison de la variabilité dans les données.

b) Partie chauffée du bord d'attaque

Les températures T5 sur la partie chauffée du bord d'attaque à l'intrados sont supérieures à celles T4 à l'extrados, étant en moyenne de 17°C plus élevée dans l'air sec et de 10°C pendant le givrage. Il en est de même pour les températures mesurées sur la paroi intérieure du profil au-dessous de l'élément chauffant, T3 y étant en moyenne de 10°C plus élevée que T1 à l'intrados sans givrage et de 8°C plus élevée pendant le givrage. Si on exclut la condition de l'air sec soit celle où les plus grandes variations de température ont été observées, les valeurs mesurées en surface et à l'intérieur du profil pendant le givrage sont en moyenne de $9 \pm 1^\circ\text{C}$ plus élevées à l'intrados qu'à l'extrados.

c) Effet du givrage

On peut noter une chute drastique des températures en surface et à l'intérieur du profil pendant le givrage par rapport à celles mesurées dans l'air sec. Par exemple, au point de contrôle T4 en surface à l'extrados la température passe de 41.5°C, la valeur mesurée en l'absence de gouttelettes, à 12,9°C dans la condition la moins sévère ($T_a = -5^\circ\text{C}$ et $V = 21 \text{ m/s}$) et à 8,3°C dans celle la plus sévère ($T_a = -20^\circ\text{C}$ et $V = 33 \text{ m/s}$). Cette chute de température comprise entre 29 et 34°C selon la sévérité du givrage provient du fait que, pendant le givrage, les pertes de chaleur dues à l'évaporation et/ou à la sublimation de l'eau au-dessus des parties mouillées et/ou glacées du profil viennent s'ajouter à celle occasionnée par la convection se produisant dans l'air sec. Cette chute de température va également occasionner une diminution importante du gradient thermique en surface de l'élément chauffant et donc de l'énergie unitaire ou la puissance entrant à l'intérieur du profil à l'équilibre. Par ailleurs pour le reste du mémoire on s'intéressera tout particulièrement aux données enregistrées lors du givrage, cette dernière étant la seule représentative de l'opération d'un système électrothermique en mode antigivrage.

d) Calcul de la puissance entrant dans le profil

Les puissances à l'équilibre entrant dans le profil via l'élément chauffant à l'intrados et à l'extrados ont été calculées à partir des données déjà présentées aux tableaux précédents. Pour ces calculs les mêmes raisons que celles données dans l'analyse de la température restent applicables. Ainsi on prendra pour les puissances fournies PE et PI les valeurs moyennes des quatre essais plutôt que les celles calculées pour chaque essai considéré individuellement. Les valeurs moyennes des puissances (Watt) à l'équilibre entrant dans le profil W0 chauffé sont résumées au Tableau 7, ces dernières étant calculées en accord avec l'équation 2 à partir des valeurs moyennes des deux gradients thermiques mesurés sur le bord d'attaque, l'un à l'intrados et le second à l'extrados. Les détails des calculs sont présentés dans les fiches d'essais à l'annexe C.

Tableau 5. Puissance (Watt) entrant dans le profil W0 chauffé à l'extrados P_E
et à l'intrados P_I

Test	Dans l'air sec			Dans la condition de givrage			Ratios P_{int}/P_t
Puissance fournie	P_E	P_I	$P_{int}(1)$	P_E	P_I	$P_{int}(1)$	Sans givrage Avec givrage
Essai n° 1 W= 124 Watts	22,1	48,9	71,0	15,2	40,7	55,9	0,57 0,45
Essai n° 2 W= 155 Watts	18,9	121,1	140,0	11,0	70,6	81,6	0,90 0,52
Essai n° 3 W= 160 Watts	25,2	23,2	48,4	19,3	42,6	61,9	0,30 0,39
Essai n° 4 W= 195 Watts	18,1	67,8	83,4	15,1	47,7	62,8	0,43 0,32
Moyenne W= 159 Watts	21,1	65,3	86,4	15,2	50,4	65,6	0,55 ± 0,30 0,42 ± 0,10

$$(1) P_{int} = P_E + P_I \text{ et } P_t = W$$

D'après le Tableau 7, on peut noter que la puissance ou l'énergie unitaire moyenne (65,3 Watts) pénétrant à l'intérieur du profil à l'intrados à l'équilibre est 3,2 fois plus grande que celle à l'extrados (21,1 Watts) dans l'air sec. Ce ratio augmente à 4,3 dans la condition de givrage. La plus grande puissance entrant dans le profil à l'intrados est due à la plus grande température à cet endroit. Cela pourrait être explicable en partie par la plus grande surface de chauffage à l'intrados qu'à l'extrados ; en effet le bord d'attaque est chauffé à l'intrados sur une surface de 0,015 m², soit sur une étendue deux fois plus grande que la valeur de 0,0075 m² à l'extrados. La plus grande température à l'intrados pourrait provenir en partie de l'angle de 6° du profil dans la soufflerie; en effet avec un angle d'attaque positif, le volume d'air qui circule à l'intrados ou en dessous du profil est plus

faible que celui passant à l'extrados ou au-dessus, ce qui contribue à y diminuer la convection et donc d'y augmenter la température.

Étant donné la grande variabilité dans les données, on ne tiendra compte dans les calculs de l'énergie unitaire que de la puissance totale P_T soit la somme de P_I et P_E . À partir des rapports de P_T du tableau 7 aux valeurs de la puissance W de l'élément chauffant dans chaque essai, il est possible d'évaluer le pourcentage moyen de l'énergie du chauffage qui pénètre pendant le givrage à l'intérieur du profil en fibre de verre W0 à $42 \pm 10\%$. Dans l'air sec, ce pourcentage y est un peu plus grand en raison de la plus haute température du bord d'attaque; toutefois cette condition n'est pas représentative du fonctionnement du système antigivrage et pour cette raison ne fait pas l'objet de l'analyse.

3.2.4 Observation de la glace formée à l'extrados

Les photos du profil W0 chauffé prises à la fin des quatre (4) premiers essais sont montrées aux Figures 3-6, 3-7, 3-8 et 3-9.

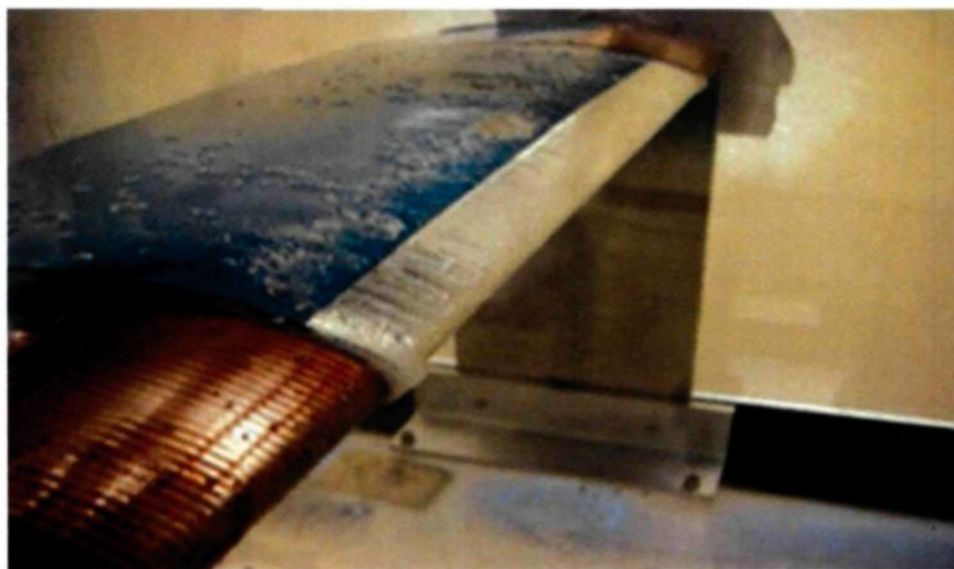


Figure 3-6. Photo du profil W0 chauffé au terme de l'essai n° 1 ($V = 21 \text{ m/s}$; $T = -5^\circ\text{C}$)

On peut voir que de la glace s'est formée sur l'extrados juste à la limite de l'élément chauffant, au-dessus duquel aucune glace ne s'est formée, mais où on peut voir des gouttes liquide. À la fin de l'essai 1, les températures T2 à l'intérieur du profil et T6 de la partie non chauffée de l'extrados valaient respectivement 12,3 et -0,2°C, la dernière donnée étant conforme à l'observation de la glace formée.



Figure 3-7. Photo du profil W0 chauffé au terme de l'essai n° 2 ($V = 21 \text{ m/s}$; $T = -20^\circ$)

La figure 3-7 présente le profil W0 au terme de l'essai 2 effectué à la même vitesse de vent que dans l'essai 1, mais à une température plus basse, soit -20°C. Sur la photo, on peut observer sensiblement la même chose que dans l'essai 1 précédent, à la différence que le front de glace à la limite de l'élément chauffant y est plus avancé. À la fin de l'essai 2, les températures T2 à l'intérieur du profil et T6 de la partie non chauffée de l'extrados valaient respectivement 16,9 et -10,1°C, la dernière donnée étant conforme à l'observation de la plus grande quantité de glace formée.

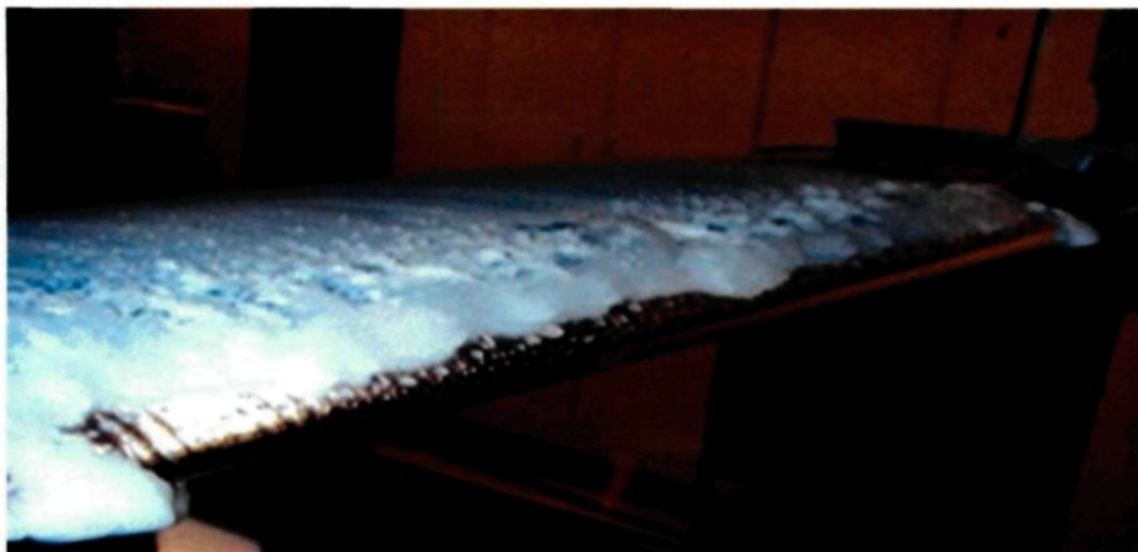


Figure 3-8. Photo du profil W0 chauffé au terme de l'essai n° 3 ($V = 33 \text{ m/s}$; $T = -5^\circ$)

La figure 3-8 montre la photo du profil W0 chauffé à la fin de l'essai n° 3. On peut constater l'effet des conditions plus froides par la formation de glace plus importante à la limite de l'élément chauffant. Toutefois, même si en apparence on peut voir de la glace au-dessus du profil, dans les faits, cette glace n'y touche pas. En effet, un petit espace entre l'élément chauffant et la couche de glace est nettement visible. À la fin de l'essai 3, les températures T2 à l'intérieur du profil et T6 de la partie non chauffée de l'extrados valaient respectivement $8,8$ et $-3,6^\circ\text{C}$, la dernière donnée étant conforme à l'observation de la glace formée.



Figure 3-9. Photo du profil W0 chauffé au terme de l'essai n° 4 ($V = 33 \text{ m/s}$; $T = -20^\circ$)

La figure 3-9 présente la photo du profil W) chauffé prise à la fin de l'essai 4 représentatif de la condition la plus sévère, où même le chauffage auxiliaire devant éliminer les effets de bouts s'est révélé insuffisant pour contrer toute formation de glace. Cela se traduit par la formation de plus gros morceaux de glace sur le profil. Toutefois, comme expliqué à la figure 3-8, même si en apparence la glace semble toucher au bord d'attaque elle est séparée de l'élément chauffant par une mince couche d'air. À la fin de l'essai 4, les températures T2 à l'intérieur du profil et T6 de la partie non chauffée de l'extrados valaient respectivement $12,1$ et $-13,3^\circ\text{C}$, la dernière donnée étant conforme à l'observation de la glace formée.

3.3 Résultats des essais sur profil chauffé avec isolation en polyéthylène

3.3.1 Profil PL avec isolation de Polyéthylène

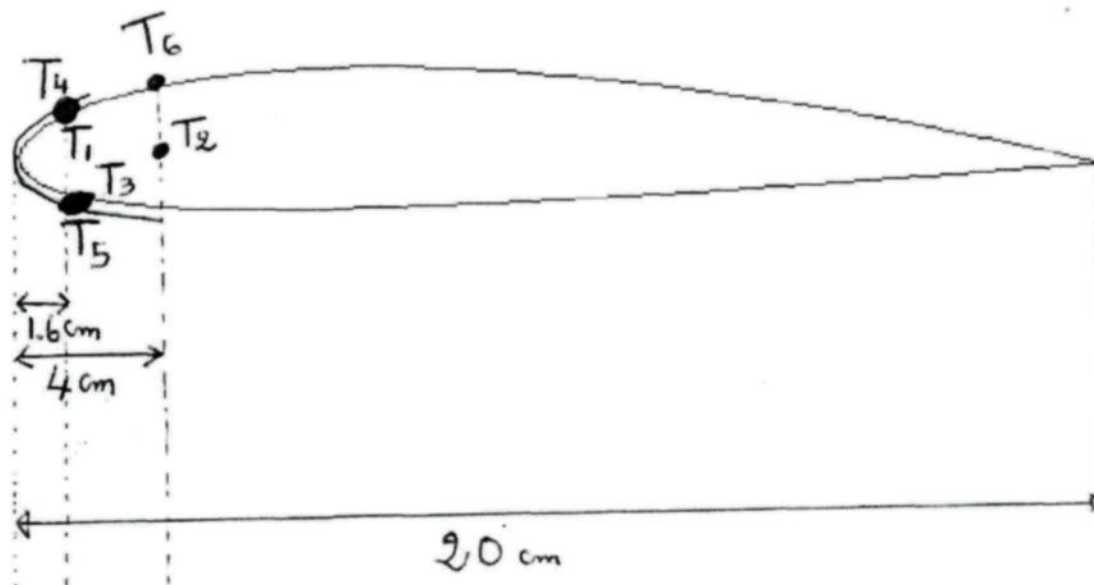


Figure 3-10. Schéma du profil d'essai PL

Le profil est similaire au profil W0, mais avec 1 mm de Polyéthylène comme isolant entre la fibre de verre et l'élément chauffant.

3.3.2 Températures enregistrées pendant les essais

Les enregistrements des six (6) températures mesurées dans le profil PL chauffé avant et pendant le givrage soumis aux mêmes conditions que celles des quatre essais du profil W0 sont présentés aux figures 3-11, 3-12, 3-13 et 3-14.

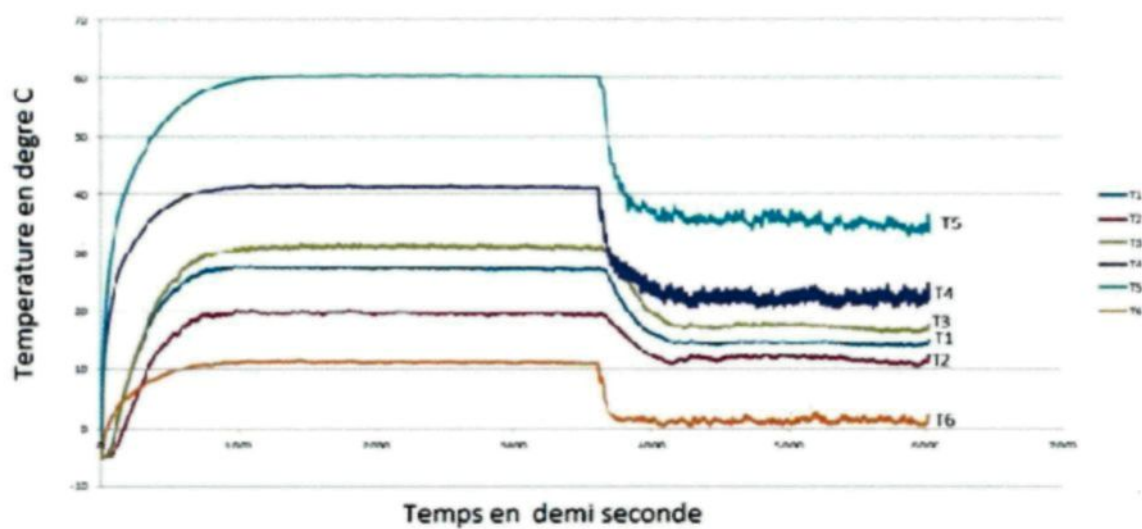


Figure 3-11. Températures enregistrées avec le profil PL lors de l'essai n° 5

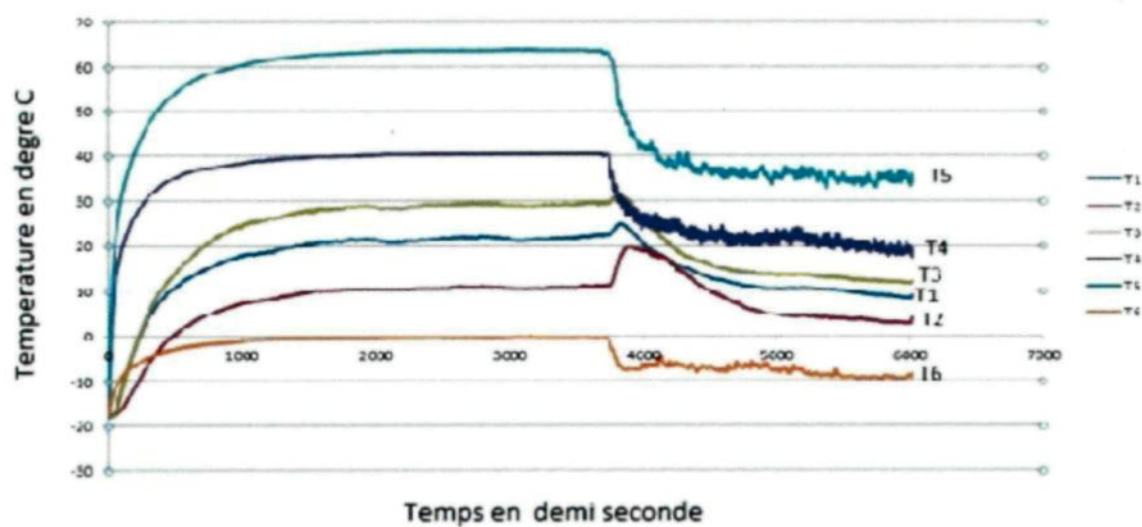


Figure 3-12. Températures enregistrées avec le profil PL lors de l'essai n° 6

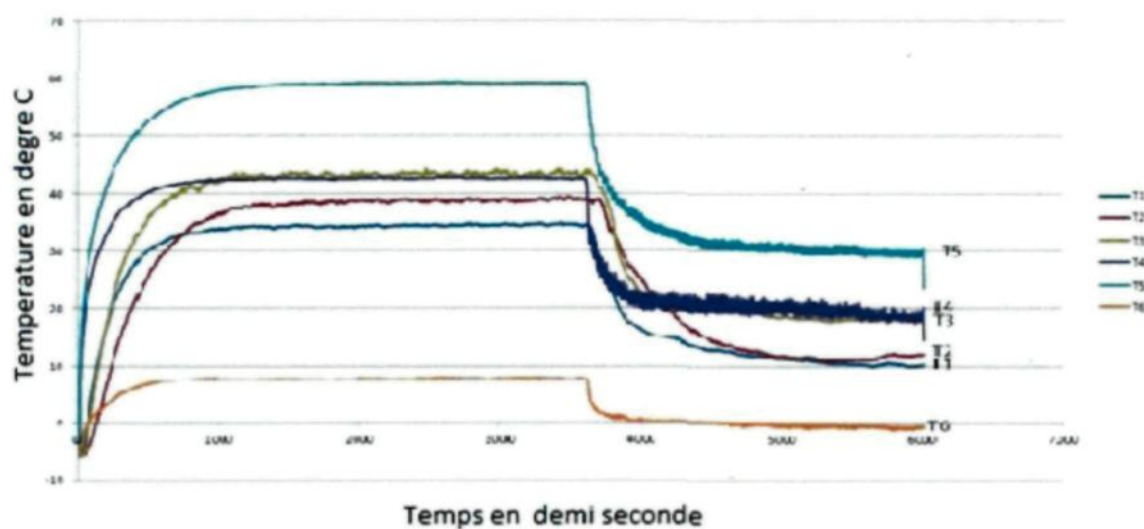


Figure 3-13. Températures enregistrées avec le profil PL lors de l'essai n° 7

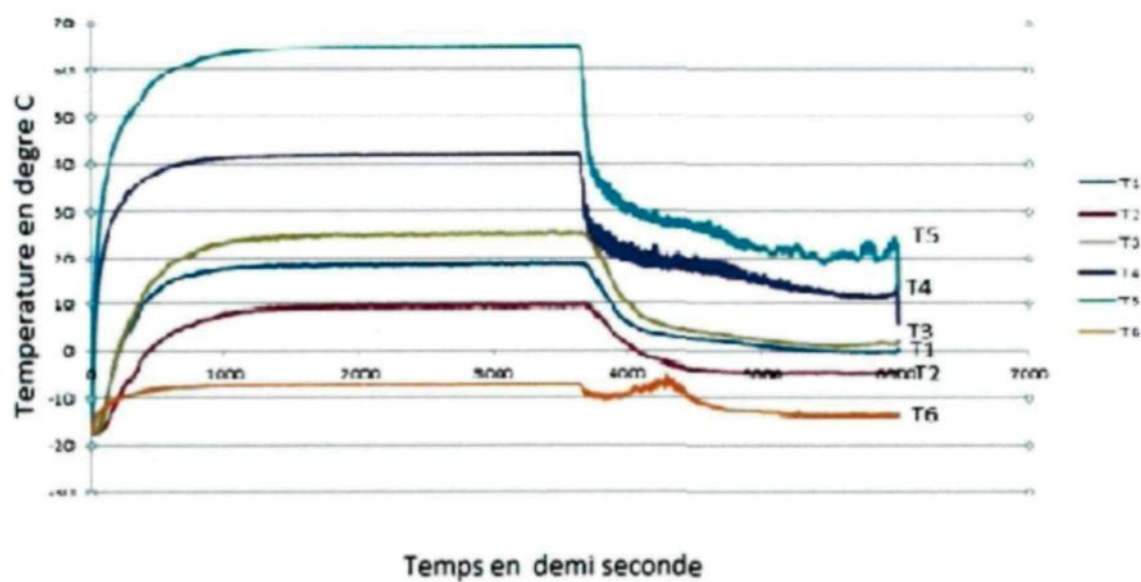


Figure 3-14. Températures enregistrées avec le profil PL lors de l'essai n° 8

3.3.3 Moyennes des températures enregistrées pendant les essais sur le profil PL

Les moyennes des températures enregistrées avec le profil PL à l'équilibre dans l'air sec et durant le givrage dans les quatre (4) conditions d'essai sont présentées aux tableaux si dessous dans le même format que celui utilisé pour les données du profil W0.

Tableau 6. Moyennes des températures enregistrées du profil PL lors de l'essai n° 5

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage °C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage °C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=20$				$T_2=12$			
$T_6=11,2$				$T_6=1,1$			
$T_4=41,2$	$T_1=28,1$	13,1		$T_4=22,2$	$T_1=14,5$	7,7	
$T_5=60,4$	$T_3=31,4$		29	$T_5=35,2$	$T_3=17,6$		17,6

Tableau 7. Moyennes des températures enregistrées du profil PL lors de l'essai n° 6

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=11,6$				$T_2=4,7$			
$T_6=0$				$T_6=-8,3$			
$T_4=40,3$	$T_1=22,2$	18,1		$T_4=21,1$	$T_1=10,3$	10,8	
$T_5=63,6$	$T_3=29,1$		34,5	$T_5=46,5$	$T_3=14,3$		32,2

Tableau 8. Moyennes des températures enregistrées du profil PL lors de l'essai n° 7

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=38,7$				$T_2=12$			
$T_6=8,1$				$T_6=-0,5$			
$T_4=42,3$	$T_1=34,1$	8,2		$T_4=20,3$	$T_1=11,2$	9,1	
$T_5=58,8$	$T_3=43$		15,8	$T_5=30,2$	$T_3=19,2$		11

Tableau 9. Moyennes des températures enregistrées du profil PL lors de l'essai n° 8

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=9,7$				$T_2=26,2$			
$T_6=-8,3$				$T_6=-17,2$			
$T_4=41,7$	$T_1=18,6$	23,1		$T_4=15,4$	$T_1=1,3$	14,1	
$T_5=24,9$	$T_3=25,1$		0,2	$T_5=25,1$	$T_3=26,8$		1,7

Dans l'ensemble, les données de températures du profil PL présentent un comportement similaire à celles du profil W0. On ne considèrera pas ici les données mesurées dans l'air sec qui ne sont pas vraiment non représentatives du fonctionnement d'un système électrothermique. Pendant le givrage, T2 et T6 les températures moyennes à l'intérieur et sur la partie non chauffée du profil PL restent sensiblement les mêmes que celles mesurées avec profil W0, valant 13,7 et -6,2 °C. Quant aux gradients thermiques à travers la paroi du profil isolé PL sous l'élément chauffant, ils sont pendant le givrage en moyenne de 3°C plus élevés que ceux du profil W0. Les valeurs moyennes des puissances (Watt) à l'équilibre entrant dans le profil W0 chauffé telles que calculées en accord avec l'équation 2 à partir des valeurs moyennes des deux gradients thermiques mesurés sur le bord d'attaque sont résumées au Tableau 8.

Tableau 8. Puissance (Watt) $P_{int} = P_E + P_I$ entrant à l'équilibre dans le profil PL chauffé

Test	Dans l'air sec			Dans la condition de givrage			Ratio P_{int}/P_t
Puissance fournie	P_E	P_I	P_{int}	P_E	P_I	P_{int}	Sans givrage Avec givrage
Essai no 5 W= 123 Watts	15,1	66,9	85,0	8,9	40,6	49,5	0,69 0,40
Essai n° 6 W=154 Watts	20,9	79,6	100,5	12,5	74,3	86,8	0,65 0,56
Essai n° 7 W= 152 Watts	9,6	36,5	46,1	10,5	25,4	35,9	0,30 0,23
Essai n° 8 W= 187 Watts	40,5	4,6	45,1	16,3	3,9	25,3	0,24 0,13
Moyenne W= 154 Watts	21,5	46,9	68,4	12,1	36,1	38,2	0,47 ±0, 20 0,33 ±0,20

Les données du Tableau 8 montrent que les puissances moyennes P_E entrant à l'intérieur du profil PL à l'intrados sont à l'équilibre supérieures aux valeurs observées à l'extrados par un facteur de 2,2 dans l'air sec et de 3,0 pendant le givrage, comme observé avec le profil W0. À partir des rapports de P_T du tableau 8 aux valeurs dans chaque essai de la puissance W de l'élément chauffant, il est possible d'évaluer à $33 \pm 10\%$ le pourcentage moyen de l'énergie du chauffage qui pénètre pendant le givrage à l'intérieur du profil PL isolé. Dans l'air sec, ce pourcentage y est un peu plus grande, en raison de la plus haute température du bord d'attaque; toutefois cette condition n'est pas représentative du fonctionnement du système antigivrage et pour cette raison ne fait pas l'objet de l'analyse.

3.3.4 Observation de la glace formée sur l'extrados

Les photos ci-dessous ont été prises pendant les essais de givrage avec le profil PL :

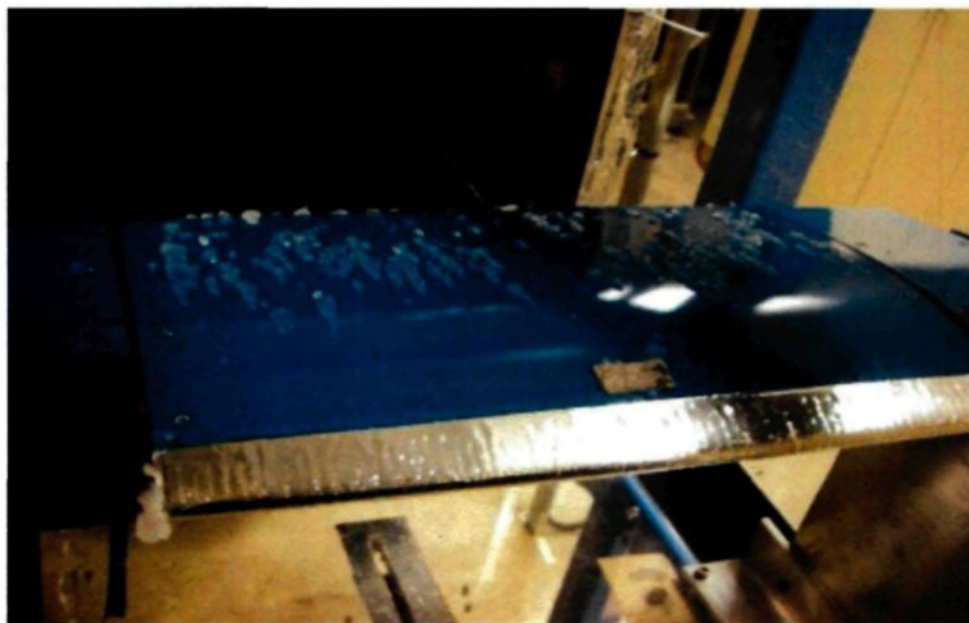


Figure 3-15. Photo du profil PL lors de l'essai n°5 ($V = 21 \text{ m/s}$; $T = -5^\circ$)

On peut voir que la glace s'est formée sur la partie non chauffée de l'extrados à partir du milieu de la corde. En bordure de l'élément chauffant, aucune glace ne s'est formée, mais le profil est recouvert de gouttes d'eau liquide.

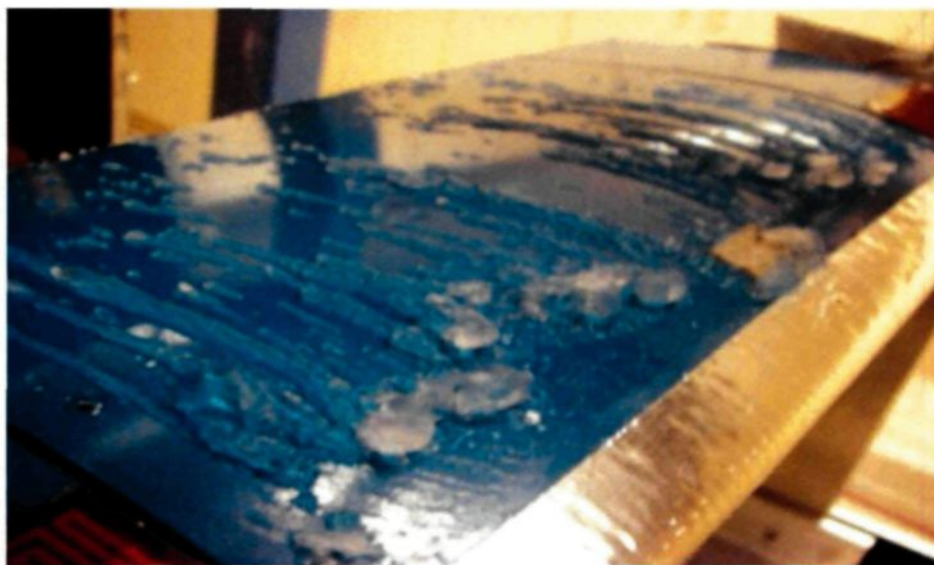


Figure 3-16. Photo du profil PL lors de l'essai n°6 ($V = 21 \text{ m/s}$; $T = -20^\circ$)

La figure 3-16 présente l'essai 6 effectué à la même vitesse d'air que l'essai 5 mais à -20°C . Sur la photo, on peut observer que le front de glace à la limite de l'élément chauffant y est plus avancé.

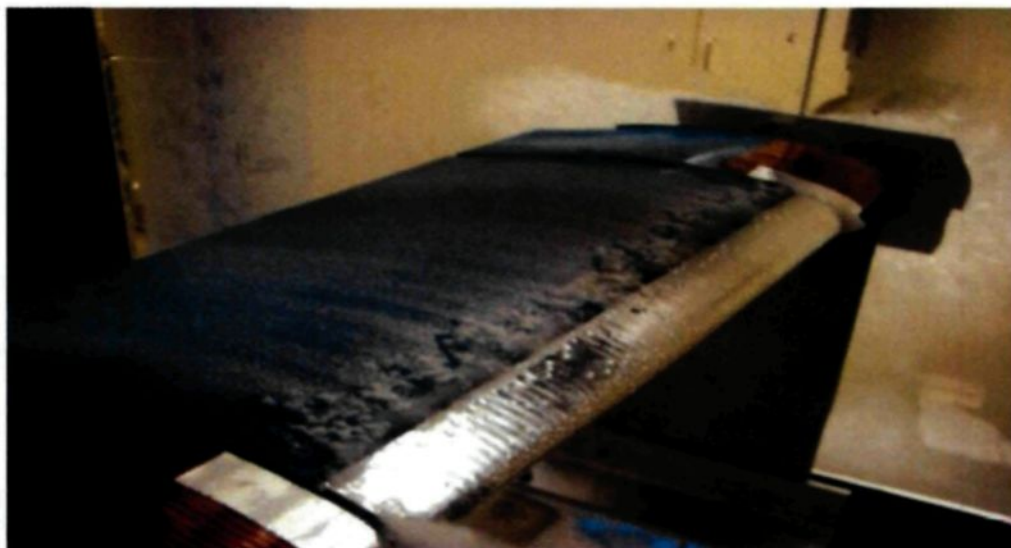


Figure 3-17. Photo du profil PL lors de l'essai n°7 ($V = 33 \text{ m/s}$; $T = -5^\circ$)

La figure 3-17 montre la photo du profil PL à la fin de l'essai n°7. On peut constater l'effet des conditions plus froides par la formation de dépôts de glace plus importants à la limite de l'élément chauffant. Toutefois, comme avec le profil W0 chauffé, même si en apparence on distingue de la glace au-dessus de l'élément chauffant, dans les faits, cette glace n'y touche pas, un espace s'étant formé entre l'élément chauffant et la couche de glace.

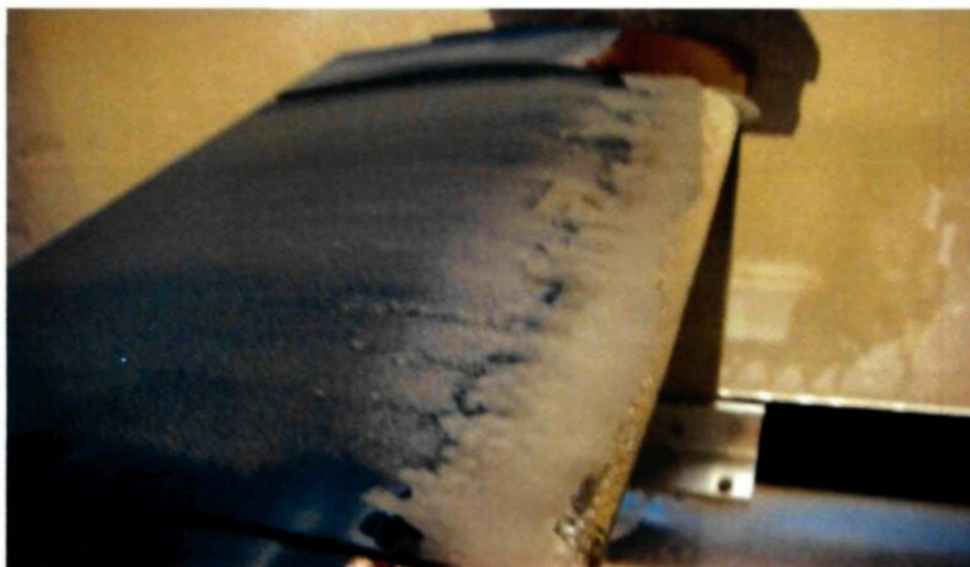


Figure 3-18. Photo du profil PL lors de l'essai n°8 ($V = 33 \text{ m/s}$; $T = -20^\circ$)

La figure 3-18 présente la photo du profil non isolé lors de l'essai 8 effectué dans les conditions les plus sévères. Cela se traduit par la formation de plus gros morceaux de glace. Toutefois, tel qu'expliqué à la figure 3-17, même si en apparence la glace semble toucher au bord d'attaque, on distingue une couche d'air entre les deux.

3.4 Résultats des essais sur profil TF avec isolation de téflon

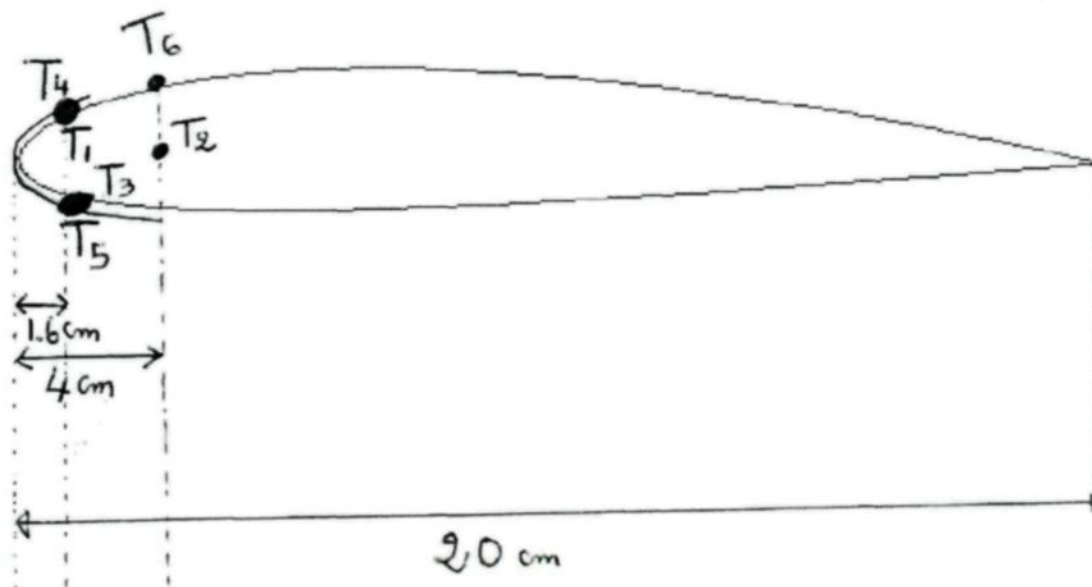


Figure 3-19. Schéma du profil d'essai TF

Le profil TF est similaire au profil W0, mais avec 1,2 mm de Téflon comme isolant entre la fibre de verre et l'élément chauffant.

3.4.1 Températures enregistrées pendant les essais

Les enregistrements de températures du profil avant et après givrage dans les quatre (4) conditions d'essais sont présentés aux quatre figures ci-dessous.

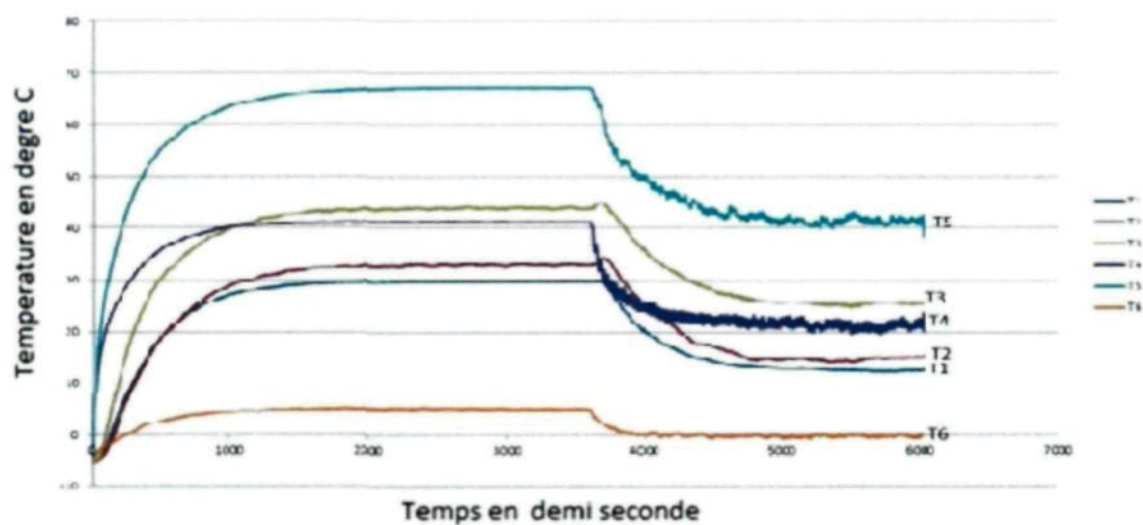


Figure 3-20. Températures enregistrées avec le profil TF lors de l'essai n° 9

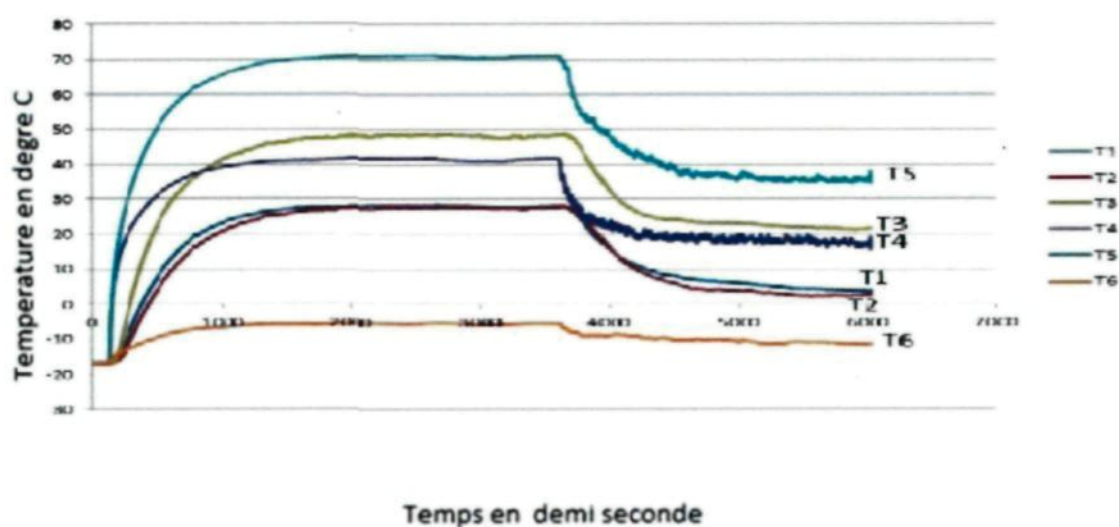


Figure 3-21. Températures enregistrées avec le profil TF lors de l'essai n° 10

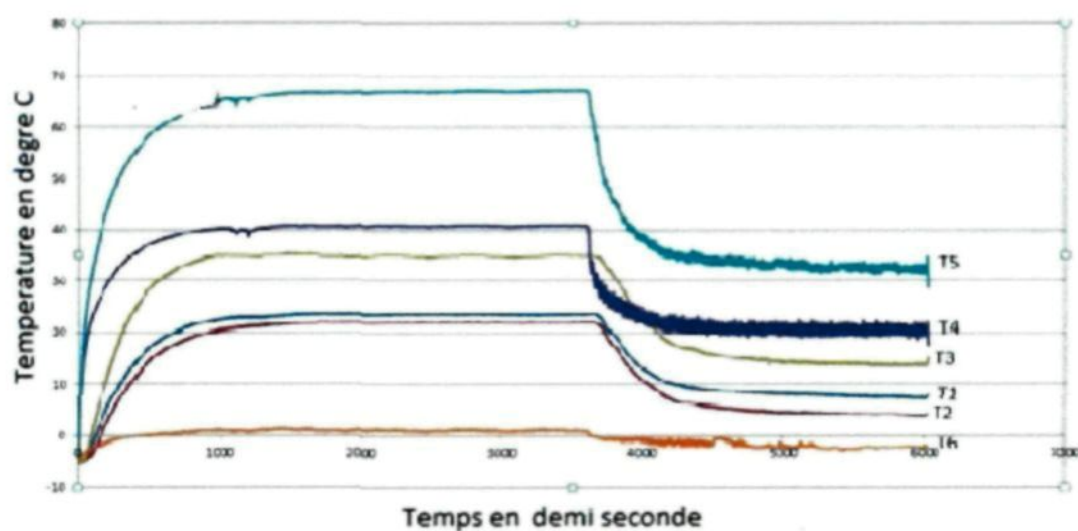


Figure 3-22. Températures enregistrées avec le profil TF lors de l'essai n° 11

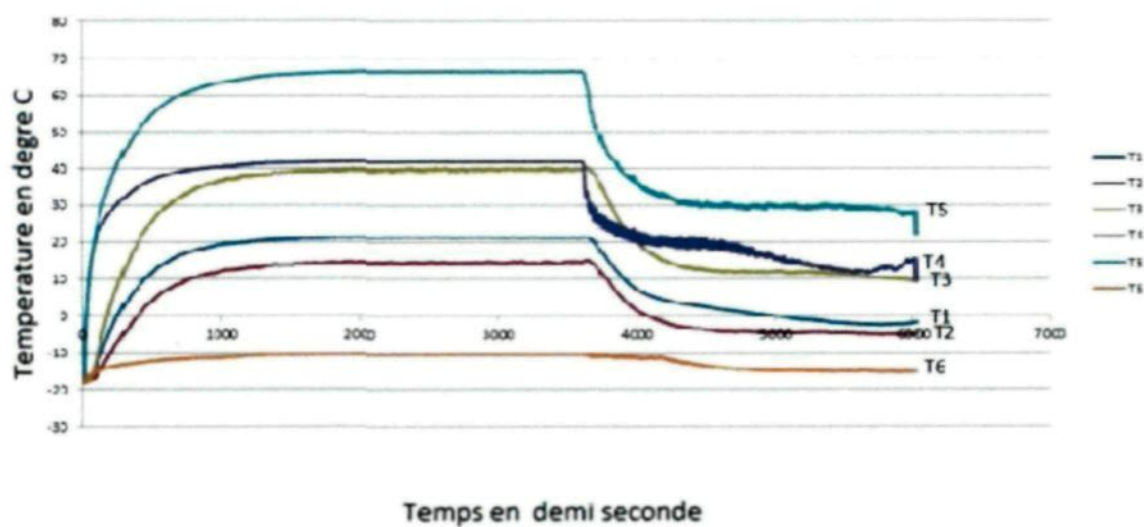


Figure 3-23. Températures enregistrées avec le profil TF lors de l'essai n° 12

3.4.2 Moyennes des températures enregistrées pendant les essais sur le profil TF

Les moyennes des températures à l'intérieur et sur le profil TF évaluées dans les deux zones de stabilisation sont présentées dans les quatre tableaux ci-dessous, chacun correspondant aux quatre (4) conditions d'essais:

Tableau 10. Moyennes des températures enregistrées du profil TF lors de l'essai n° 9

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=33,7$				$T_2=14,8$			
$T_6=5,2$				$T_6=0$			
$T_4=41,4$	$T_1=30$	11,4		$T_4=21,3$	$T_1=13,1$	8,2	
$T_5=68,2$	$T_3=44$		24,2	$T_5=41,2$	$T_3=26,4$		14,8

Tableau 11. Moyennes des températures enregistrées du profil TF lors de l'essai n° 10

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=28,1$				$T_2=13,8$			
$T_6=-4,9$				$T_6=-10,5$			
$T_4=42,3$	$T_1=28,5$	13,8		$T_4=19,1$	$T_1=16,8$	2,3	
$T_5=70,7$	$T_3=48,9$		21,8	$T_5=36,8$	$T_3=13,8$		23

Tableau 12. Moyennes des températures enregistrées du profil TF lors de l'essai n° 11

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=22,2$				$T_2=4,7$			
$T_6=1,2$				$T_6=-2,3$			
$T_4=41,1$	$T_1=23,8$	17,3		$T_4=21,2$	$T_1=8,2$	13	
$T_5=67,6$	$T_3=25,1$		42,5	$T_5=33,8$	$T_3=14,2$		19,6

Tableau 13. Moyennes des températures enregistrées du profil TF lors de l'essai n° 12

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=14,8$				$T_2=-4,8$			
$T_6=-10$				$T_6=-14,3$			
$T_4=42,3$	$T_1=20,8$	21,5		$T_4=17,5$	$T_1=0$	17,5	
$T_5=67,8$	$T_3=40$		27,8	$T_5=30$	$T_3=12,1$		17,9

De façon générale les températures à l'intérieur et sur le profil TF dans l'air sec et pendant le givrage présentent dans les deux zones de stabilisation le même comportement que celles observées avec les deux profils W0 et PE déjà testés. Comme dans le cas du profil PL et pour les mêmes raisons on ne considèrera pas ici les données mesurées dans l'air sec. Pendant le givrage, les températures T_2 à l'intérieur du profil isolé de Téflon valent en moyenne 7°C , soit une température de 6°C inférieure à celles mesurées avec les profils W0 et PL. La plus basse température interne du profil correspond à une pénétration moindre d'énergie à l'intérieur du profil en raison de la plus grande résistance thermique du Téflon comparativement au PL et à la fibre de verre. Quant aux températures T_6 de $-6,8^\circ\text{C}$ mesurée sur la partie non chauffée du profil TF, elles sont comparables aux valeurs de $-6,7$ et $-6,2^\circ\text{C}$ observées avec les profils W0 et PL. Quant aux gradients thermiques moyens observés à travers la paroi du profil TF sous l'élément chauffant, ils sont pendant le givrage de 3°C plus élevés que ceux calculés pour le profil W0. Les valeurs moyennes des puissances (Watt) à l'équilibre entrant dans le profil W0 chauffé telles que calculées en accord avec l'équation 2 à partir des valeurs moyennes des deux gradients thermiques mesurés sur le bord d'attaque sont résumées au Tableau 14.

Tableau 14. Énergie (Watt) $P_{int} = P_E + P_I$ entrant à l'équilibre dans le profil TF chauffé

Test	Dans l'air sec			Dans la condition de givrage			Ratio P_{int}/W
Puissance fournie	P_E	P_I	P_{int}	P_E	P_I	P_{int}	Sans givrage Avec givrage
Essai no 9 W= 131 Watts	9,9	42,2	52,1	7,2	25,8	33,0	0,40 0,25
Essai n° 10 W=163 Watts	12,0	38,0	50,0	2	40,1	42,1	0,31 0,26
Essai n° 11 W= 161 Watts	15,1	74,1	89,2	11,3	34,9	46,2	0,55 0,28
Essai n° 12 W= 204 Watts	18,8	48,5	67,3	15,3	31,2	46,5	0,33 0,23
Moyenne W = 165 Watts	14,0	50,7	65,7	9,0	33,0	42,0	$0,40 \pm 0,15$ $0,25 \pm 0,03$

Les données du Tableau 14 montrent que l'énergie moyenne P_E entrant à l'intérieur du profil PL à l'intrados dans les zones stables de températures sont supérieures aux valeurs observées à l'extrados par un facteur de 3,6 dans l'air sec et pendant le givrage, comme observé avec le profil W0. À partir des rapports de la valeur de P_{int} du tableau 8 à la valeur de la puissance W de l'élément chauffant dans chaque essai, il est possible d'évaluer le pourcentage moyen de l'énergie du chauffage qui pénètre pendant le givrage à l'intérieur du profil PL isolé $25 \pm 2\%$.

3.4.3 Observation de la glace formée sur l'extrados

Les photos ci-après ont été prises pendant les essais d'antigivrage sur le profil TF :



Figure 3-24. Photo du profil TF lors de l'essai n° 9 ($V = 21 \text{ m/s}$; $T = -5^\circ$)

On peut voir que la glace s'est formée sur l'extrados un peu après la bordure de l'élément chauffant, au-dessus duquel aucune glace ne s'est formée; on peut y apercevoir toutefois des gouttes d'eau liquide.



Figure 3-25. Photo du profil TF lors de l'essai n° 10 ($V = 21 \text{ m/s}$; $T = -20^\circ$)

La figure 3-25 présente l'essai 10 effectué à la même vitesse d'air que l'essai 9, mais à -20°C . Sur la photo on peut observer un front de glace à la limite de l'élément chauffant beaucoup plus important que celui obtenu à -5°C .

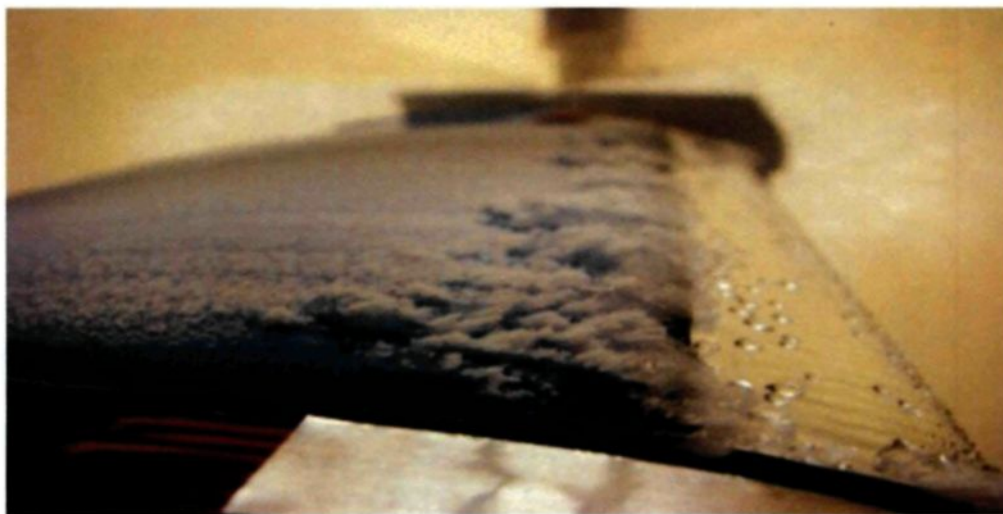


Figure 3-26. Photo du profil TF lors de l'essai n° 11 ($V = 33 \text{ m/s}$; $T = -5^\circ$)

La figure 3-26 montre la photo du profil TF pendant l'essai n° 11. On peut y constater l'effet des conditions du plus grand refroidissement obtenu à la vitesse de vent de 33 m/s; en effet, le front de glace y est plus important et se forme au-dessus de l'élément chauffant. Toutefois, même si en apparence peut y apercevoir de la glace, cette dernière n'y touche pas. On peut y apercevoir en effet un mince espace d'air entre l'élément chauffant et la couche de glace.



Figure 3-27. Photo du profil TF lors de l'essai n° 12 ($V = 33 \text{ m/s}$; $T = -20^\circ$)

La figure 3-27 présente la photo du profil TF lors de l'essai effectué dans les conditions les plus sévères. Cela se traduit par la formation de plus gros morceaux de glace. Toutefois, tel qu'expliqué à la figure 3-26, même si en apparence le front de glace semble toucher au bord d'attaque, on peut y apercevoir une mince couche d'air.

3.5 Résultats des essais avec le profil HY recouvert d'une peinture hydrophobe

3.5.1 Profil d'essai HY

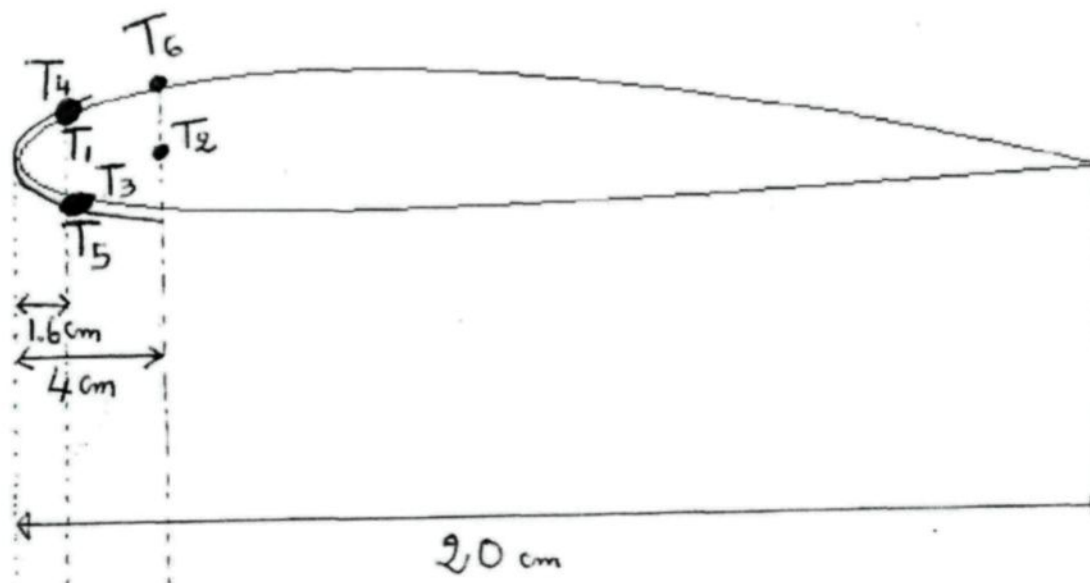


Figure 3-28. Profil HY

Le profil HY est le profil PL isolé avec 1 mm de Polyéthylène qui a été recouvert d'une mince couche d'une peinture hydrophobe.

3.5.2 Températures enregistrées pendant les essais

Les enregistrements de température obtenus dans les essais du profil HY chauffé avant et après givrage dans les quatre (4) mêmes conditions que les trois autres profils sont présentés aux figures 3-28, 3-29, 3-30 et 3-31.

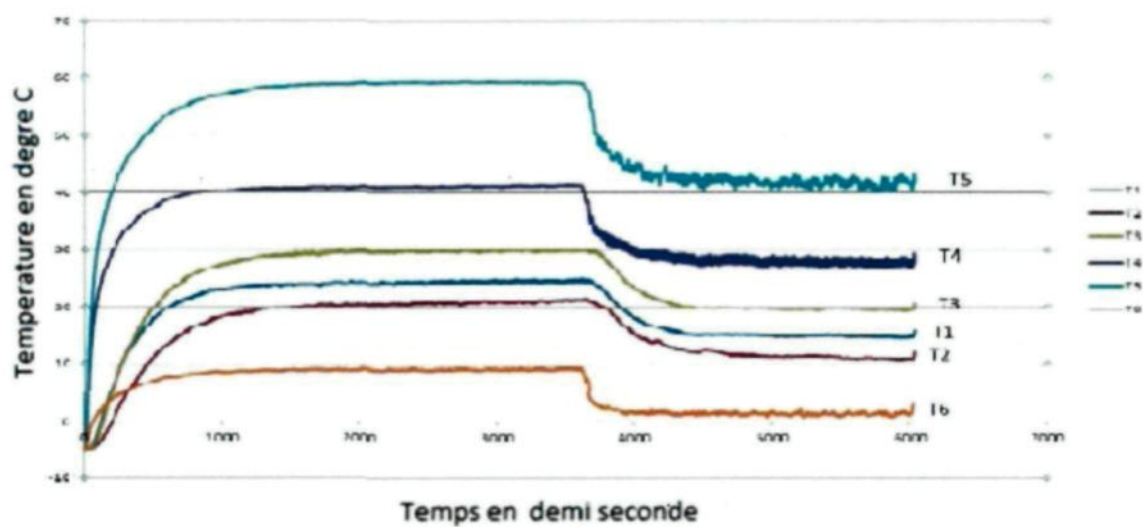


Figure 3-28. Températures enregistrées avec le profil HY lors de l'essai n° 13

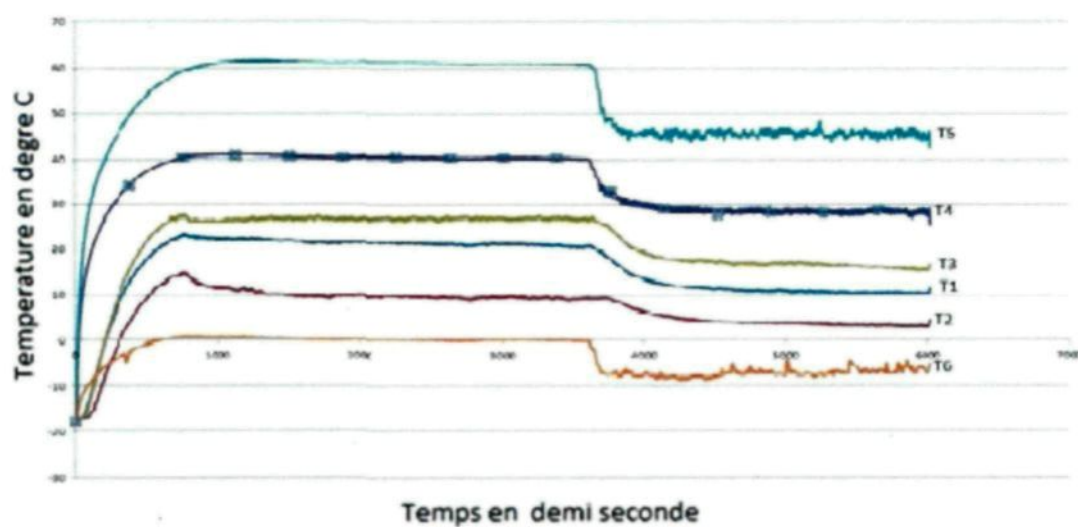


Figure 3-29. Températures enregistrées avec le profil HY lors de l'essai n° 14

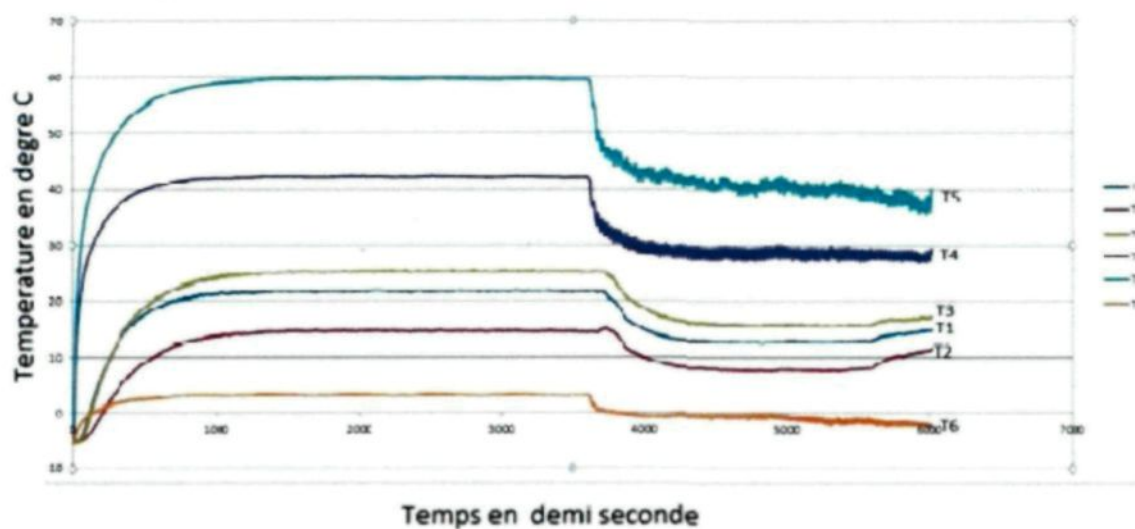


Figure 3-30. Températures enregistrées avec le profil HY lors de l'essai n° 15

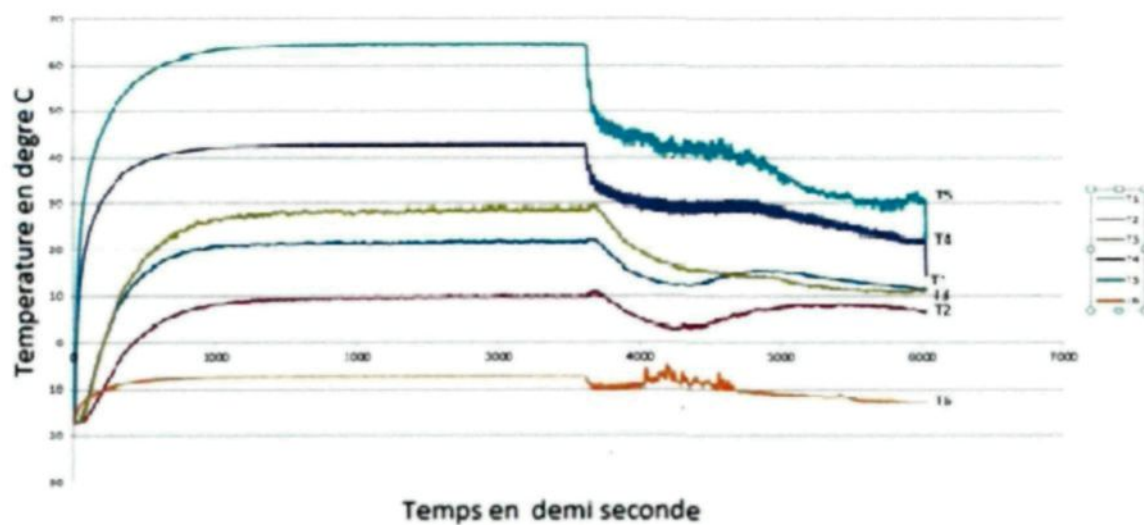


Figure 3-31. Températures enregistrées avec le profil HY lors de l'essai n° 16

3.5.3 Moyennes des températures enregistrées pendant les essais sur le profil HY

Les moyennes des températures à l'intérieur et sur le profil HY évaluées dans les deux zones de stabilisation sont présentées dans les quatre tableaux ci-après, chacun correspondant aux quatre (4) mêmes conditions de refroidissement que pour les trois autres profil :

Tableau 14. Moyennes des températures enregistrées du profil HY lors de l'essai n° 13

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=21,1$				$T_2=11,3$			
$T_6=9$				$T_6=2,1$			
$T_4=41,3$	$T_1=15$	26,3		$T_4=28,1$	$T_1=15$	13,1	
$T_5=59$	$T_3=19,5$		39,5	$T_5=42$	$T_3=19,5$		22,5

Tableau 15. Moyennes des températures enregistrées du profil HY lors de l'essai n° 14

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=9,9$				$T_2=4,8$			
$T_6=0$				$T_6=-8,3$			
$T_4=40,5$	$T_1=21,3$	19,2		$T_4=29,1$	$T_1=10,5$	18,6	
$T_5=61,1$	$T_3=27,6$		33,5	$T_5=46,8$	$T_3=17,8$		29

Tableau 16. Moyennes des températures enregistrées du profil HY lors de l'essai n° 15

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=21,1$				$T_2=11,3$			
$T_6=9$				$T_6=2,1$			
$T_4=41,3$	$T_1=24,6$	16,7		$T_4=28,1$	$T_1=15$	13,1	
$T_5=59$	$T_3=30$		29	$T_5=42$	$T_3=19,5$		22,5

Tableau 17. Moyennes des températures enregistrées du profil HY lors de l'essai n° 16

Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=10$				$T_2=8,1$			
$T_6=12$				$T_6=-10,9$			
$T_4=42$	$T_1=22,1$	19,9		$T_4=28,1$	$T_1=15,2$	12,9	
$T_5=64,7$	$T_3=28,9$		35,8	$T_5=38,1$	$T_3=13,4$		24,7

En principe on devrait s'attendre à ce que les données de températures du profil HY présentent un comportement très similaire à celui observé avec profil PL. En effet ce dernier a déjà été testé dans les essais 5, 6, 7, et 8 dans les mêmes conditions de refroidissement, la seule différence étant la couche de peinture hydrophobe en recouvrant l'extrados. On peut toutefois quelques différences dans l'air sec et pendant le givrage entre les deux enregistrements de températures dans les deux zones de stabilisation de température. Dans l'air sec, avec le profil HY les valeurs moyennes des températures T2 et T6 des quatre essais sont respectivement de 16 et 8°C, soit 4°C plus froides pour T2 et 5°C plus chaudes pour T6 que celles enregistrées avec le profil PL sans revêtement hydrophobe, ces dernières valant respectivement 20 et 3°C. Pendant le givrage, on fait le même constat, les températures moyennes T2 et T6 du profil HY se situant respectivement à 9 et -2°C, soit de 5°C plus froides à l'intérieur et de 4°C plus chaude sur la partie non chauffée de l'extrados que les valeurs de 14 et -6°C mesurées avec le même profil PL sans peinture hydrophobe. Dans l'hypothèse que cette différence est liée la couche hydrophobe, ce dernier aurait pour effet d'augmenter de 4- 5°C le gradient de température à travers la paroi au bord d'attaque.

Quant aux gradients thermiques à travers la paroi du profil HY chauffé, les données des quatre tableaux précédents montrent pendant le givrage qu'ils sont en moyenne de 5°C plus élevés que ceux calculées avec le profil PL sans revêtement hydrophobe. Les valeurs moyennes des puissances (Watt) à l'équilibre entrant dans le profil W0 chauffé telles que calculées en accord avec l'équation 2 sont résumées au Tableau 19.

Tableau 19. Énergie (Watt) $P_{int} = P_E + P_I$ entrant dans le profil HY chauffé à l'équilibre

Test	Dans l'air sec			Dans la condition de givrage			Ratio P_{int}/W
Puissance fournie	P_E	P_I	P_{int}	P_E	P_I	P_{int}	Sans givrage Avec givrage
Essai no 13 W= 122 Watts	29,4	88,4	117,8	14,7	50,4	65,1	0,96 (0,69) 0,53 (0,40)
Essai n° 14 W=152 Watts	21,5	75,0	96,5	20,8	64,9	85,7	0,63 (0,65) 0,56 (0,56)
Essai n° 15 W= 153 Watts	18,7	64,9	83,6	14,7	50,4	65,1	0,55 (0,30) 0,42 (0,23)
Essai n° 16 W= 186 Watts	22,3	80,1	102,4	14,4	55,3	69,7	0,55 (0,24) 0,37 (0,13)
Moyenne W= 153 Watts	23,0	77,1	100,1	16,2	55,3	71,5	$0,67 \pm 0,25$ $(0,47 \pm 0,20)$ $0,47 \pm 0,10$ $(0,33 \pm 0,20)$

Les données du Tableau 19 montrent que l'énergie moyenne P_E dans les zones de stabilisation entrant à l'intérieur du profil HY à l'intrados sont supérieures aux valeurs observées à l'extrados par un facteur de 3,4 dans l'air sec et pendant le givrage, comme observé avec les autres profils testés. À partir des rapports des valeurs de P_{int} du tableau 19 à celles de la puissance W de l'élément chauffant, il est possible d'évaluer pour chaque essai le pourcentage de l'énergie du chauffage qui pénètre à l'intérieur du profil HY; ici le pourcentage moyen calculé est $47 \pm 10\%$ pendant le givrage. Les valeurs placées entre parenthèses correspondent aux ratios obtenus avec le profil PL sans revêtement hydrophobe, pour un pourcentage moyen de $33 \pm 20\%$ de l'énergie du chauffage perdue

dans le profil. Considérant les erreurs allant de 10 à 20% dans les mesures et les calculs, on peut considérer que les deux valeurs seraient comparables.

3.5.4 Observation de la glace formée sur l'extrados

Les figures ci-après comparent les photos du profil HY (à droite) avec celles déjà présentées (à gauche) du même profil sans revêtement hydrophobe soumis aux quatre mêmes conditions d'essais.



Figure 3-32. Profil HY (essai n° 13 : 122 W) à droite, et profil PL (essai n° 5 : 123 W) à gauche



Figure 3-33. Profil HY (essai n° 14 : 152 W) à droite, et profil PL (essai n° 6 : 154 W) à gauche

À première vue, il semble que les quantités de glace recouvrant la partie non chauffée des profils HY et PL visibles aux Figures 3-32 et 3-33 sont très comparables, les niveaux de sévérité du givrage et les puissances de chauffage étant les mêmes.

Toutefois, aux Figures 3-34 et 3-35 représentatives des deux conditions de givrage les plus sévères, on peut observer une différence dans les quantités et la morphologie de la glace déposée. En effet, le traitement avec le produit hydrophobe (noir) semble rendre le chauffage du bord d'attaque plus efficace, légèrement à la figure 3-34 mais de façon significative à la figure 3-35 où, pour le même niveau de sévérité de givrage et une puissance de chauffage 8-10% moindre, le front de glace recouvre la partie chauffée à l'avant du profil, à moitié seulement lorsque traitée avec le produit hydrophobe, et totalement lorsque non traitée.



Figure 3-34. Profil HY (essai n° 15 : 153 W) à droite, et profil PL (essai n° 7 : 161 W) à gauche



Figure 3-35. Profil HY (essai n° 16 : 186 W) à droite, et profil PL (essai n° 8 : 204 W) à gauche

CHAPITRE 4

BILAN DES RESULTATS

4.1 Description du phénomène

Le profil d'aile est chauffé à l'aide d'un système électrothermique collé sur le bord d'attaque, dont la puissance de chauffage $P_{tot} = W$ en Watts se divise en deux composantes, l'une pénétrant à l'intérieur de l'aile qui ne contribue pas directement au chauffage, P_{int} , et la seconde utilisable pour réchauffer l'air et les gouttelettes surfondues P_{out} de façon à maintenir le bord d'attaque à température positive.

$$P_{tot} = P_{int} + P_{out}$$

Le but de ce mémoire est d'étudier comment réduire ou minimiser la puissance qui pénètre à l'intérieur du profil, P_{int} , et de cette façon maximiser la chaleur pour chauffer les gouttelettes, comme le montre la figure 4-1. En effet, la puissance entrant dans l'aile ne peut servir au chauffage et empêcher la formation de glace.

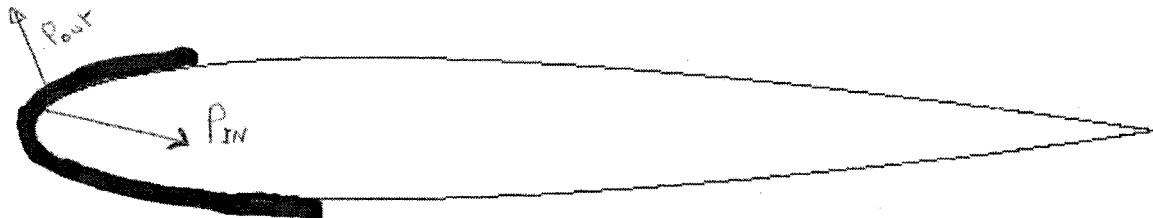


Figure 4-1. Représentation des puissances sur le profil

Afin de minimiser la puissance interne, deux matériaux isolants, le Polyéthylène et le Téflon, ont été mis à l'essai, chacun étant placé entre le système de chauffage et la paroi en fibre de verre, cette dernière agissant également comme isolant. Ce chapitre analyse l'effet de ces différents isolants sur la puissance perdue dans l'aile P_{int} et celle utilisable pour l'antigivrage P_{out} eu égard aux facteurs externes de sévérité de l'environnement, soit l'intensité du givrage, la température et la vitesse du vent.

4.2 L'effet des isolants sur la puissance disponible

4.2.1 Puissance de chauffage avec le profil PL

La répartition de la puissance de chauffage $P_{tot} = W$ avec le profil W0 pendant le givrage est résumée au tableau 23, dans les quatre (4) conditions de température et de vitesse de vent, avec givrage, dans l'ordre croissant des pertes de chaleur par convection, cet ordre correspondant sensiblement à celui de l'exécution des essais. La répartition de la puissance de chauffage dans l'air sec a été évaluée (étant présentée au tableau 5), mais n'est pas analysée parce qu'elle n'est pas représentative du fonctionnement réel d'un système électrothermique.

Tableau 18. Répartition de la puissance avec le profil W0 pendant le givrage

Essai	V m/s	T air	EVW g/m ² s	P_{tot} watts	P_{int} watts	P_{out} watts	P_{int} en%
1g	21	-5,1	5,02	124	55,9	68,1	45
2g	21	-17,4	5,02	155	81,6	73,4	52
3g	33	-5,1	8,84	160	61,9	97,8	39
4g	33	-17,4	8,84	195	62,8	135,1	32
Moyenne				159	65,6	92,4	42 ±10

Avec le profil W0 dans l'air sec, la puissance moyenne P_{int} entrant dans l'aile est de 55% de la puissance totale de l'élément chauffant. Pendant le givrage, la puissance P_{int} diminue en moyenne à $42 \pm 10\%$. Plus la condition de givrage est sévère, plus la puissance servant à chauffer l'intérieur du profil diminue.

L'histogramme présenté à la figure 4-2 résume les données de la puissance P_{out} dissipée dans l'air sec et en présence de gouttelettes surfondues.

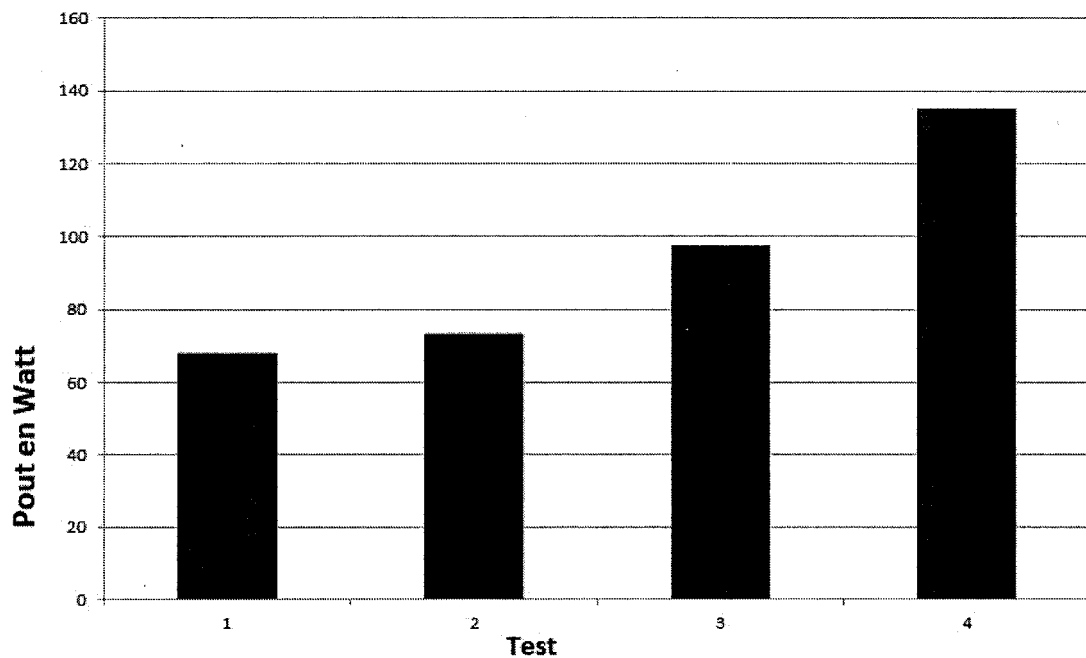


Figure 4-2. Histogramme du comportement de la puissance sans isolation

Avec le profil W0 en fibre de verre, sur la base des données de l'histogramme à la figure 4-2 on dispose en moyenne pendant le givrage de 10% plus de puissance pour chauffer les gouttelettes surfondues et ainsi empêcher la formation de glace que dans l'air sec.

4.2.2 Répartition de la puissance avec le profil PL isolé de polyéthylène

La répartition de la puissance de chauffage dans la condition de givrage du profil PL isolé avec 1,2 mm de polyéthylène est résumée au tableau 24, dans l'ordre croissant des pertes de chaleur par convection, cet ordre n'étant pas parfois celui de l'exécution des essais, comme dans les essais décrits à la section 4.2.1.

Tableau 19. Répartition de la puissance avec le profil PL pendant le givrage

Essai	V m/s	T air	EVW g/m ² s	P_{tot} watts	P_{int} watts	P_{out} Watts	P_{int} en%
5	21	-5,1	5,02	123	49,5	73,5	40
7	33	-5,1	8,84	152	35,9	117	23
6	21	-17,4	5,02	154	86,8	97	56
8	33	-17,4	8,84	187	25,3	157	13
Moyenne				154	49,5	104,5	33 ±20

Avec le profil PL isolé de 1,2 mm de polyéthylène dans l'air sec, la puissance P_{int} perdue dans le profil représente en moyenne $33 \pm 20\%$ de la puissance totale du chauffage. Pendant le givrage, 1,2 mm de polyéthylène qui s'ajoute à la paroi en fibre de verre a permis de diminuer la puissance P_{int} perdue dans l'aile, en la faisant passer de 42% en moyenne (cas du profil W0) à 33% (cas du profil PL) de la puissance de chauffage P_{tot} . L'histogramme présenté à la figure 4-3 résume les données du tableau 24, de façon à y comparer les contributions P_{out} et P_{int} pendant le givrage. Les valeurs mesurées dans l'air sec ont déjà été présentées au tableau 8.

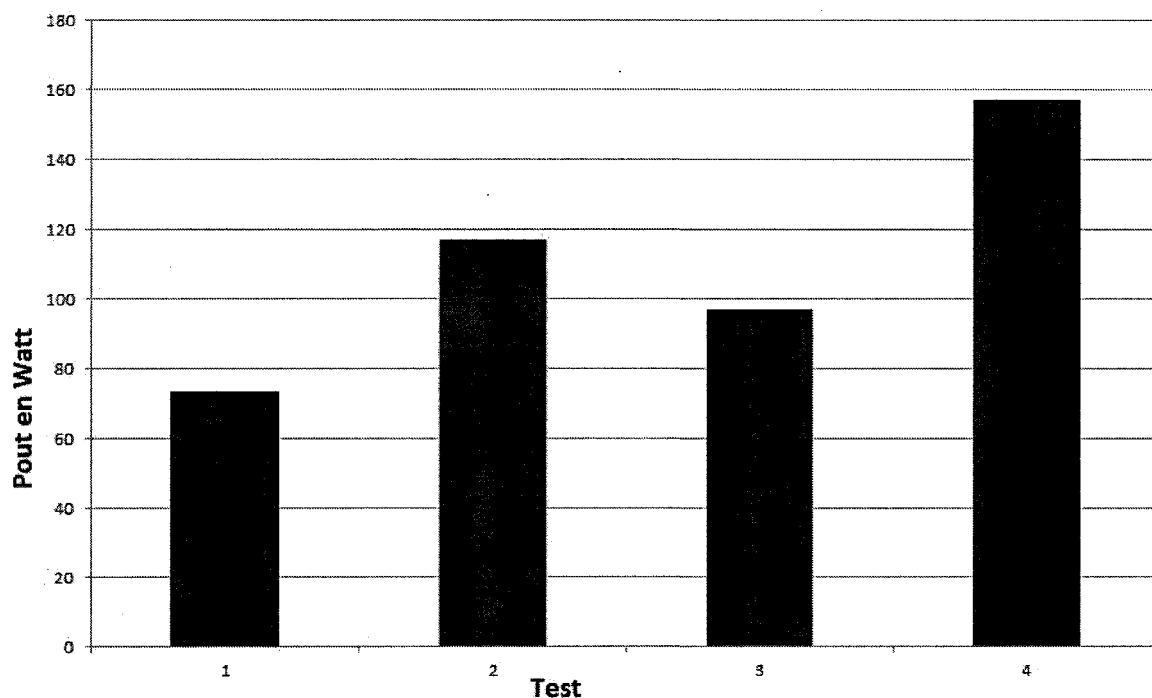


Figure 4-3. Répartition de la puissance avec une isolation en polyéthylène

Pendant le givrage, si on compare les résultats avec ceux du profil W0 où $42 \pm 10\%$ de la puissance de l'élément chauffant entrainé dans l'aile, l'ajout de 1,2 mm de PE a permis de réduire la puissance perdue P_{int} à $33 \pm 20\%$. La puissance entrant dans le profil est alors réduite de 21%.

$$P_{Red} = \frac{42 - 33}{42} * 100 = 21\%$$

4.2.3 Répartition de la puissance avec le profil TF

La répartition de la puissance de chauffage avec le profil TF isolé avec 1 mm de téflon soumis aux mêmes conditions que les profils W0 et PL est présentée au tableau 25 dans un ordre légèrement différent de celui de l'exécution des essais.

Tableau 20. Répartition de la puissance avec une isolation en téflon

Essai	V m/s	T air	EVW g/m ² s	P_{tot} watts	P_{int} watts	P_{out} w atts	P_{int} en %
9g	21	-5,1	5,02	131	33,0	98,0	25
11g	33	-5,1	8,84	161	46,2	114,8	28
10g	21	-17,4	5,02	162	42,1	119,9	26
12g	33	-17,4	8,84	204	46,5	157,5	23
Moyenne				164,5	41,9	122,5	26 ±3

Sur la base des données du tableau 25 on peut voir que pendant le givrage 1 mm de téflon a permis de diminuer la puissance P_{int} perdue à l'intérieur du profil à $26 \pm 3\%$ par rapport à la valeur de $42 \pm 10\%$ obtenue pour le profil W0. L'histogramme présenté à la figure 4-4 résume les données du tableau 25 de la puissance P_{out} utilisable pendant le givrage pour le chauffage de l'air et des gouttelettes. Les valeurs mesurées dans l'air sec ont d'jà été présentées au tableau 14.

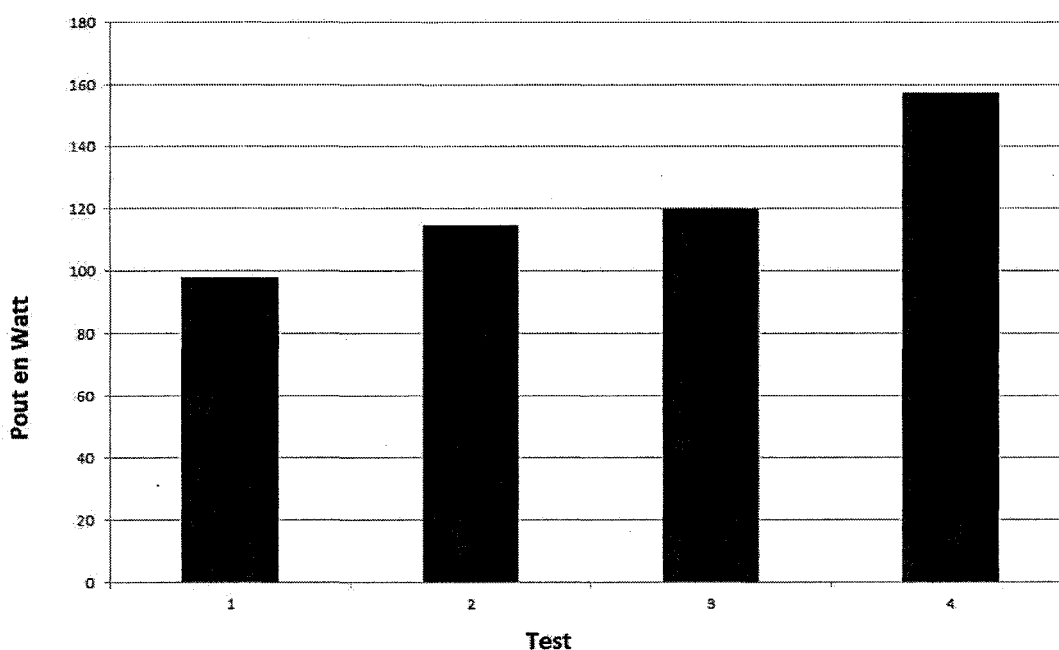


Figure 4-4. Répartition de la puissance avec une isolation en téflon

Pendant le givrage, si on compare les résultats avec ceux du profil W0 où $42 \pm 10\%$ de la puissance de l'élément chauffant entrainé dans l'aile, l'ajout de 1 mm de Téflon a permis de réduire cette dernière à $26 \pm 3\%$, ce qui représente une diminution de 39% de la puissance perdue.

$$P_{red} = \frac{42 - 25.5}{42} = 39\%$$

4.2.4 Répartition de la puissance avec le profil HY traité d'une peinture hydrophobe

La répartition de la puissance de l'élément chauffant avec le profil recouvert d'une Peinture hydrophobe HY est résumée au tableau 26 lorsque soumis aux quatre (4) mêmes conditions que celles où les trois profils précédents ont été testés, dans un ordre légèrement différent de celui de l'exécution des essais.

Tableau 21. Répartition de la puissance avec une isolation en polyéthylène et une peinture hydrophobe

Essai	V m/s	T air	EVW g/m ² s	P_{tot} watts	P_{int} watts	P_{out} watts	$P_{int}\%$
13g	21	-5,1	5,02	122	65,1	56,9	53
15g	33	-5,1	8,84	153	65,1	87,9	42
14g	21	-17,4	5,02	152	85,7	80,9	56
16g	33	-17,4	8,84	186	69,7	116,3	37
Moyenne				153	71,4	85,5	47 ± 10

Pendant le givrage avec le profil HY recouvert d'une peinture hydrophobe la puissance à l'équilibre P_{int} entrant dans l'aile est en moyenne de $47 \pm 10\%$ de la puissance totale de chauffage W , l'erreur étant estimée à $\pm 21\%$. Avec le même profil sans recouvrement de peinture hydrophobe, on a obtenu comme perte de chaleur pendant le givrage une valeur de $33 \pm 20\%$, l'erreur y étant de $\pm 61\%$. L'histogramme présenté à la figure 4-5 résume les données du tableau 26. Les valeurs mesurées dans l'air sec sont celles déjà présentées au tableau 19.

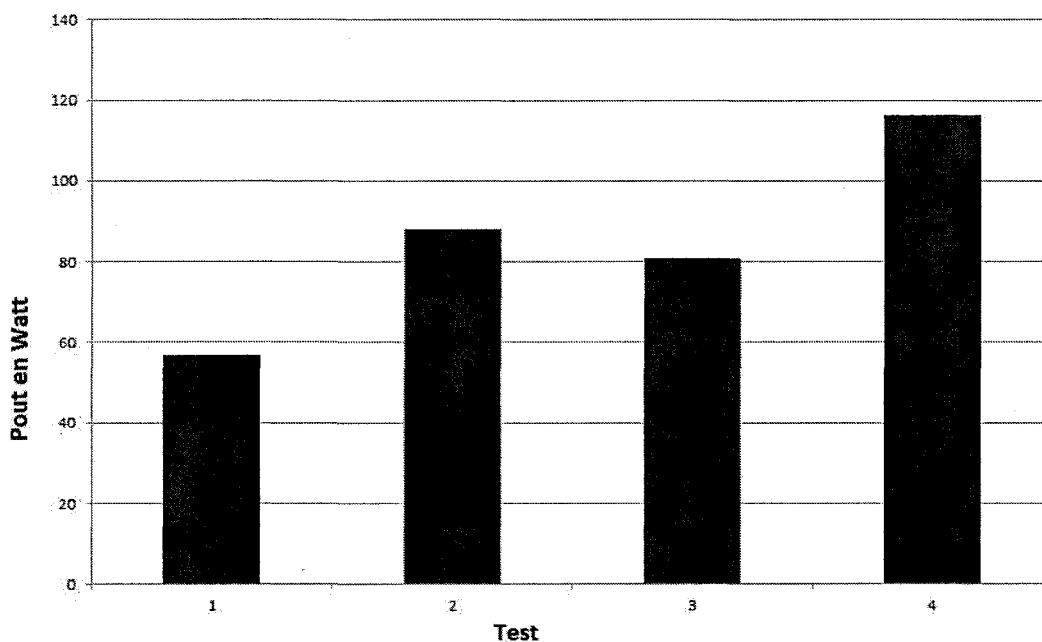


Figure 4-5. Répartition de la puissance avec une isolation en polyéthylène et une peinture hydrophobe

Considérant les fluctuations dans les mesures, on peut considérer que les puissances perdues dans le profil HY traité restent comparables à celles obtenues avec le profil PL non traité, ces dernières variant dans l'intervalle des erreurs expérimentales de $\pm 21\%$ (profil HY traité) et de $\pm 61\%$ (profil PL non traité). Dans les faits, c'est la série des quatre essais avec le profil PL qui a présenté les plus grandes fluctuations soit $\pm 61\%$; par ailleurs les fluctuations les plus faibles de $\pm 3\%$ ont été obtenues dans les essais avec le profil TF, soit celui doté de la plus grande isolation.

Pour expliquer la grande variabilité observée, les sources d'erreurs sont multiples : un seul essai par condition, un suivi imparfait du protocole expérimental, les variations de $\pm 3^\circ\text{C}$ de la température à laquelle l'essai débute, la surface de chauffage deux fois plus grande à l'intrados qu'à l'extrados, la dissymétrie dans l'écoulement d'air à l'intrados et l'extrados due à l'angle d'attaque de $6 \pm 1^\circ$, les fluctuations dans la teneur en eau liquide, les perturbations dans les paramètres de givrage, etc. Quant à l'effet du traitement hydrophobe, on a observé sur la partie chauffée à l'extrados du profil traité une légère

augmentation du gradient de température accompagnée dans la condition de refroidissement la plus sévère d'une diminution significative du front de glace.

Pour obtenir une plus grande précision, il aurait fallu augmenter le nombre d'essais et de reprendre certains essais, dont ceux dont les mesures ont présenté les plus grandes fluctuations, de manière à en reconfirmer la validité. En raison de la problématique particulière à l'effet hydrophobe évalué dans quatre conditions seulement, le phénomène demanderait à être étudié plus en profondeur. Devant le petit nombre de données en main, on peut difficilement intégrer les résultats dans le présent travail autrement qu'à partir des valeurs moyennes.

4.3 Discussion

Les résultats de l'effet de l'isolation sur la puissance moyenne perdue à l'intérieur du profil P_{int} pendant le givrage sont résumés au tableau 27 et à la figure 4-6 où elle est représentée en fonction de la résistance thermique croissante propre à chaque profil : la fibre de verre avec $38 \times 10^{-4} \text{ (K. m}^2\text{) / W}$, la fibre de verre recouverte de 1,2 mm de PE avec $65 \times 10^{-4} \text{ (K. m}^2\text{) / W}$, et la fibre de verre recouverte de 1,0 mm de Téflon avec $86 \times 10^{-4} \text{ (K. m}^2\text{) / W}$. Dans ces calculs on ne tient pas compte des espaces d'air entre chaque couche isolante, ni de l'épaisseur de la couche de peinture.

Tableau 22. La puissance intérieure P_{int} perdue en fonction de la résistance thermique des trois couches isolantes

Isolant	Résistance thermique ($K \cdot m^2/W$)	$P_{int}\%$
Fibre de verre	$38 \cdot 10^{-4}$	42
Fibre de verre + polyéthylène	$65 \cdot 10^{-4}$	33
Fibre de verre + téflon	$86 \cdot 10^{-4}$	25

L'idée est de trouver la résistance thermique permettant de réduire la puissance intérieure P_{int} à une valeur comprise disons entre 5 et 20%. Pour ce faire, on doit extrapoler la courbe du graphique semi-logarithmique de la figure 4-6.

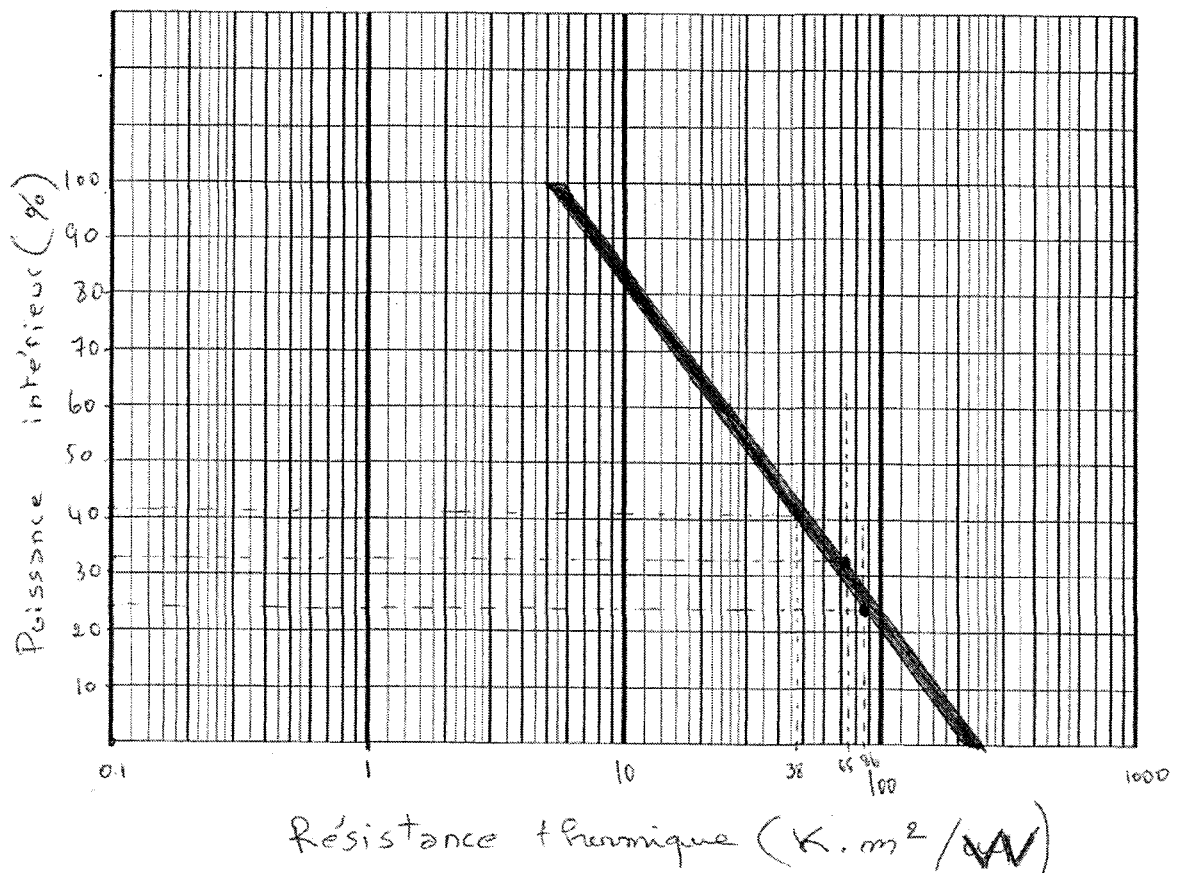


Figure 4-6. La puissance intérieure en fonction de la résistance thermique pour les trois essais

À partir de la courbe de la figure 4-6 extrapolée aux valeurs cibles de P_{int} , il est possible de déterminer l'épaisseur de la couche de l'isolant, polyéthylène, téflon, et autre matériau en utilisant définition de la résistance thermique réarrangée de manière à isoler Δ_x :

$$\Delta_x = R_{th} * k$$

Δ_x : épaisseur de l'isolant

R_{th} : résistance thermique

k : conductivité thermique

Les valeurs de la conductivité thermique k de la fibre de verre, du Polyéthylène et du Téflon sont données au tableau 2.1 où elles sont comparées à celles de la fibre de carbone et de l'aluminium, deux matériaux utilisés pour les pales d'éolienne. Les épaisseurs de PE et TF requises pour réduire les pertes de chaleur à une valeur cible comprise entre 5 et 20% sont résumées au tableau 23 ci-après :

Tableau 23. Épaisseurs des isolants PL et TF en fonction de % P_{int} perdue

% P_{int}	R_{th} (K. m^2/W)	k Poly W/m.K	Δ_x Poly (mm)	k Téflon W/m.K	Δ_x Téflon (mm)
20%	140×10^{-4}	0,37	5,1	0,25	3,5
15%	200×10^{-4}	0,37	7,4	0,25	5,0
10%	240×10^{-4}	0,37	8,8	0,25	6,0
5%	350×10^{-4}	0,37	13,0	0,25	8,8

Afin de réduire la puissance intérieure P_{int} à 5%, il aurait été nécessaire avec le Téflon le meilleur isolant utilisé dans cette étude d'avoir une épaisseur de 9 mm; ce qui

pose un grand défi à la construction de la pale puisqu'il n'est pas facile de façon pratique de coller une telle épaisseur sur le bord d'attaque d'une pale d'éolienne.

De plus on ne connaît pas bien à quel point une couche de téflon d'une épaisseur de 9 mm collée sur le bord d'attaque va affecter l'aérodynamisme de la pale.

De façon à minimiser l'épaisseur de la couche isolante, on peut envisager l'utilisation d'autres matériaux de conductivités thermiques plus faibles et en même temps pouvant résister à la température atteinte lors du dégivrage. On peut suggérer ici par exemple le polyester ou la silice qui ont une conductivité thermique respective de 0,17 et 0,10 W/(m. K),

Le tableau 29 présente les épaisseurs des couches de polyester et du film de silice qui seraient requises pour réduire la puissance intérieure dans le profil de pale de 5 à 20%

Tableau 24. Épaisseurs de polyester et de silice à utiliser afin de réduire P_{int}

Isolant	k W/(m. K)	$\Delta_x(20\%)$ (mm)	$\Delta_x(15\%)$ (mm)	$\Delta_x(10\%)$ (mm)	$\Delta_x(5\%)$ (mm)
Polyester	0,17	2,4	3,4	4	6
Silice	0,10	1,4	2,0	2,4	3,5

Il pourrait être envisageable avec un film de silice de 2,5 mm de réduire la perte d'énergie dans la pale à moins de 10%.

La courbe présentée à la figure 4-6 telle que dérivée des données expérimentales obtenues à partir de profil de petites dimensions peut également être utilisables pour déterminer le % P_{int} d'énergie perdue dans les pales non isolés en fibre de carbone ou en aluminium de 5 mm à partir de leur résistance thermique. Ainsi pour un profil similaire non isolé mais en fibre de carbone dont la conductivité thermique $4,5 \times 10^{-4}$ (K. m^2 /W) est 9 fois plus grande que celle de la fibre de verre, la perte d'énergie extrapolée serait de l'ordre

de 75%, comparativement à 42% dans le profil en fibre de verre. Pour un même profil en Aluminium, la perte d'énergie serait plus 95% de la chaleur du chauffage.

Il serait encore possible à partir de la courbe expérimentale de la figure 4-6 d'extrapoler la chaleur perdue à l'intérieur d'éléments de plus grandes dimensions autres que les pales exposés aux mêmes intensités de givrage, comme par exemple les ailes d'aéronefs et les pales d'hélicoptères, compte tenu des facteurs comme l'inertie thermique, dont dépend le temps de stabilisation à la température d'équilibre et le mode de chauffage comme par exemple dans les cas où la puissance de chauffage est injectée au moyen de très brèves impulsions à ampérages très élevés.

CONCLUSIONS

À partir des valeurs de températures mesurées à six endroits à l'intérieur et en surface de quatre profils de pales d'éolienne chauffés au bord d'attaque en mode antigivrage, trois présentant différents niveaux d'isolation et un traité avec une peinture hydrophobe, il est possible de tirer les principales conclusions suivantes quant à l'effet de la qualité de l'isolation sur le pourcentage de puissance perdue et l'effet d'une couche de peinture hydrophobe. Rappelons ici l'objectif principal de cette étude qui est l'optimisation de l'isolation thermique d'un système de dégivrage électrothermique à partir des résultats de 16 essais effectuée en soufflerie réfrigérée où les quatre profils ont été givrés dans les quatre mêmes conditions.

- a) Les quatre conditions expérimentales utilisées dans les essais de givrage sont représentatives des valeurs réelles des vitesses de vent, de températures, et d'intensité de givrage rencontrées lors d'opération d'une pale équipée d'un système électrothermique. Toutefois en raison du petit nombre d'essais complétés, un seul essai par condition, et du petit nombre des points de mesures de températures restreints à six, les valeurs des puissances calculées présentent une très grande variabilité, étant comprises entre $\pm 12\%$ dans le cas du profil isolé avec le Téflon et $\pm 60\%$ dans le cas du profil isolé de Polyéthylène. Pour cette raison les puissances pénétrant dans l'aile ont dû être considérées à partir de la moyenne des valeurs obtenues à l'intrados et à l'extrados et ce dans les quatre conditions simulées.
- b) En dépit de ces limitations, on a pu établir à partir des résultats obtenus une relation expérimentale entre la puissance P_{int} entrant à l'intérieur du profil et la résistance thermique de l'isolation du profil. Ainsi avec le profil isolé seulement de la fibre de verre cette dernière représente en moyenne 42% de la puissance fournie par l'élément chauffant. Avec le même profil isolés avec 1,2 mm de polyéthylène et 1,0 mm de

téflon, les valeurs de P_{int} diminuent en moyenne à 33% et 25% de la puissance de chauffage.

- c) Il est possible d'utiliser ces résultats pour déterminer le niveau d'isolation que doit présenter une pale d'éolienne, d'hélicoptère, et même une aile d'avion, de façon à répartir efficacement la puissance de chauffage.
- d) Quant au recouvrement hydrophobe, il semble rendre le dégagement des parties chauffées plus efficace comparativement au même profil non traité exposé aux mêmes conditions de glace.

RECOMMANDATIONS

Sur la base des résultats obtenus, qui sont très encourageants pour l'isolation d'un système électrothermique de dégivrage, les travaux futurs suivants sont suggérés :

- la conception d'un autre profil de pale avec une isolation calculée sur la base des résultats de la figure 4-6 et ainsi valider cette dernière avec une plus grande précision;
- l'augmentation de points de mesures des flux de chaleur entrant dans le profil combinée à l'utilisation de senseurs spécialement conçus pour cette mesure;
- la réalisation d'essais dans des conditions de givrage plus sévères que celles choisies dans cette étude et qui sont plus représentatives du site de Murdochville;
- la détection du givre pour la mise en route du dégivrage n'a pas été étudiée ici; c'est cependant un point capital pour le dégivrage électrothermique qui doit être mis en route si et seulement si un besoin est détecté.

RÉFÉRENCES

- [1] : Ministère des ressources naturelles du Québec <http://www.mrn.gouv.qc.ca/>
- [2] : FORTIN.G Cours thermodynamique de la glace atmosphérique.
- [3] : Secourisme sécurité et sauvetage : <http://best-secourisme.blogspot.com/2011/04/>
- [4] : Accumulation de cristaux de givrage, février 2007, Jérôme Mathey-Objectif Sciences.
- [5]: A tree branch completely englobed in freezing rain, December 30th 2009, Nicolas M.Perrault.
- [6]: Effects of icing on Wind Turbine Fatigue loads, 2007 j.phys: Conf. Ser. 75012061, Peter Frohboese and Amdreas anders.
- [7]: Simulation numérique et expérimental de l'écoulement de l'air et de l'accrétion de glace autour d'une pale éolienne, Clement Ochart Octobre 2006.
- [8] : Système electrothermique de degivrage pour une pale d'eolienne : simulations en soufflerie refrigerée et impact sur la puissance produite, Christine Mayer, juillet 2007.
- [9]: T. Laakso, E. Peltola. 2005. Review on blade heating technology and future prospects. 7-8 march 2005. Saarislka.Finland.
- [10]: Wind energy: Cold Weather Issues, Antoine Lacroix, Dr. James F. Manwell, University of Massachusetts at Amherst, Renewable Energy Research Laboratory, June 2000.
- [11]: Deicer for aircraft: James Crist, Patent No: Us 6, 520, 452 B1, Feb/18/2003.
- [12]: Microwave deicing and anti-icing sustem for aircraft: Jonathan T. Salisbury, patent number : 5, 615, 849.

Annexe A : documentation technique sur la fibre de verre



PRODUCT INFORMATION

OC® FABRICS OC® DOUBLE BIAS FABRICS (±45°)

PRODUCT DESCRIPTION

OC® Double Bias Fabrics are a stitch-bonded composite reinforcement combining equal amounts of continuous fiber oriented in the +45° and -45° directions into a single fabric. This construction offers off-axis reinforcement without the need to rotate other materials on a bias. The versatile fabric, made from high-quality fibers, is available in a variety of widths and weights to meet your particular requirements. The input fibers are designed to give controlled wet-out and excellent laminate properties. Each fabric can be combined with a glass mat or veil for enhanced performance, surface finish or handling.

PRODUCT APPLICATION

OC Double Bias Fabrics offer superior structural performance in applications subject to extreme shear and torsion stress. These properties are ideal for applications such as wind blades, marine panels, and snowboards. These fabrics offer improved conformability over biaxial fabrics yet maintain comparable laminate properties, making them ideal for placement within complex parts. Reduced fabric print-through results in enhanced aesthetics on finished products while offering material and labor savings.

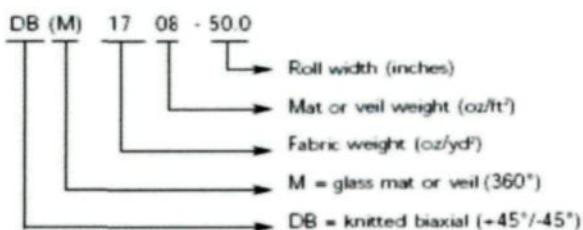
FEATURES

- CRIMP-FREE CONSTRUCTION
- OPPOSING ±45° FABRIC CONSTRUCTION OFFERS RESISTANCE TO TWISTING
- EXCELLENT CONFORMABILITY
- REDUCE PRINT-THROUGH
- CAN BE COMBINED WITH VARIOUS MATS (CONTINUOUS FILAMENT MAT, WET FORMED MAT, CHOPPED STRANDS AND VEIL)
- AVAILABLE IN A VARIETY OF WIDTHS AND WEIGHTS

PRODUCT BENEFITS

- IMPROVED FIBER ALIGNMENT AND MECHANICAL PROPERTIES
- FINISHED PARTS PERFORM UNDER EXTREME SHEAR AND TORSION STRESS
- IMPROVED PLACEMENT IN COMPLEX PARTS
- ENHANCED AESTHETICS WITH MATERIAL AND LABOR SAVINGS
- IMPROVED PRINT-THROUGH, COST-EFFECTIVE SECONDARY BONDING AND HANDLING
- OFFERS SOLUTIONS FOR WIDE RANGE OF APPLICATIONS

PRODUCT NOMENCLATURE





OC® FABRICS OC® DOUBLE BIAS FABRICS (±45°)

PHYSICAL PROPERTIES / AVAILABLE PRODUCTS

FABRIC STYLE	TOTAL WEIGHT (OZ/YD²)	0°	90°	+45°	-45°	MAT	DRY THICKNESS (INCHES)
DB120	11.6	0	0	5.6	5.6	0	0.021
DBM1208	19.3	0	0	5.6	5.6	7.6	0.037
DB170	17.6	0	0	8.6	8.6	0	0.029
DBM1708	24.9	0	0	8.6	8.6	7.6	0.044
DBM1708G	24.9	0	0	8.6	8.6	7.6	0.044
DBM1715	31.2	0	0	8.6	8.6	13.5	0.049
DBM1715G	31.2	0	0	8.6	8.6	13.5	0.049
DB240	24.7	0	0	12.1	12.1	0	0.034
DBM2408	32.3	0	0	12.1	12.1	7.6	0.048
DBM2408G	32.3	0	0	12.1	12.1	7.6	0.048
DBM2415	38.2	0	0	12.1	12.1	13.5	0.057
DBM2415G	38.2	0	0	12.1	12.1	13.5	0.057

SAMPLE MECHANICAL PROPERTIES

Sample Mechanical Properties of Laminate based on DB170
(50% glass content by weight).

	ENGLISH UNITS	SI UNITS
Tensile (ASTM D 638)		
Strength	39.8 ksi	274 MPa
Modulus	2.18 msi	15.0 GPa
Compression (ASTM D 695)		
Strength	36.6 ksi	252 MPa
Modulus	2.06 msi	14.2 GPa
Flexural (ASTM D 790)		
Strength	69.9 ksi	482 MPa
Modulus	2.00 msi	13.8 GPa

Sample Mechanical Properties of Laminate based on
DBM1708 (50% glass content by weight).

	ENGLISH UNITS	SI UNITS
Tensile (ASTM D 638)		
Strength	39.8 ksi	274 MPa
Modulus	2.18 msi	15.0 GPa
Compression (ASTM D 695)		
Strength	36.6 ksi	252 MPa
Modulus	2.06 msi	14.2 GPa
Flexural (ASTM D 790)		
Strength	69.9 ksi	482 MPa
Modulus	2.00 msi	13.8 GPa



MEMBER OF THE PINK®

COMPOSITE SOLUTIONS



**OWENS CORNING
WORLD HEADQUARTERS**
ONE OWENS CORNING PARKWAY
TOLEDO, OHIO 43659
1.800.GET.PINK
www.owenscorning.com/composites

OWENS CORNING LATIN AMERICA
AV. DAS NAÇÕES UNIDAS, 17.891-30 AND
CEP - 04796-100
SÃO PAULO, BRAZIL
55.11.5514.7900

**EUROPEAN OWENS CORNING
FIBERGLAS S.A.**
CHAUSSÉE DE LA HULPE, 166
B-1170 BRUSSELS
BELGIUM
32.2.674.82.11

OWENS CORNING ASIAPACIFIC
HANCHI BUILDING 3F
1-2-9 SHIKAKOEN, MINATO-KU
TOKYO, 106-0011 - JAPAN
81.3.5733.1671

This information and data contained herein is offered solely as a guide in the selection of a reinforcement. The information contained in this publication is based on actual laboratory data and field test experience. We believe this information to be reliable, but do not guarantee its applicability to the user's process or assume any responsibility or liability arising out of its use or performance. The user agrees to be responsible for thoroughly testing any application to determine its suitability before committing to production. It is important for the user to determine the properties of its own commercial compounds when using this or any other reinforcement. Because of numerous factors affecting results, we make no warranty of any kind, express or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this data sheet shall not be construed as representations or warranties or as inducements to infringe any patent or violate any law, safety code or insurance regulation.

THE PINK PANTHER™ & © 1964-2003 Metro-Goldwyn-Mayer Studios Inc. All rights reserved. The color PINK is a registered trademark of Owens Corning.
Pub No. 57910-D October 2003 Copyright © 2003 Owens Corning Produced by mass communications



PRODUCT INFORMATION

OC® FABRICS OC® UNIDIRECTIONAL FABRICS (0° OR 90°)

PRODUCT DESCRIPTION

OC® Unidirectional Fabric is a composite reinforcement designed for applications requiring a high concentration of reinforcement in only one direction.

This is achieved by placing continuous fibers in either a 0° or 90° direction. These fibers are held in place by either interweaving a lightweight hot melt yarn to lock the unidirectional fibers in place, or by stitching the fibers in place using a stitch yarn. The versatile fabric, made from high-quality fibers, is available in a variety of widths and weights to meet your particular requirements. The input fibers are designed to give controlled wet-out and excellent laminate properties. Each fabric can be combined with a glass mat or veil for enhanced performance or surface finish.

PRODUCT APPLICATION

OC Unidirectional Fabrics provide excellent strength and stiffness along the fiber direction. They also provide the highest ratio of axial strength to weight. This combination of properties makes these fabrics ideal for demanding applications with a high aspect ratio (length to width ratio) such as wind blades, poles, and stringers. These fabrics are also useful in applications where a discrete area requires additional strength or stiffness. Wrapping of existing structural components, such as columns and beams, with unidirectional fabrics could also greatly increase the lifespan and performance of these critical load-bearing members. These fabrics are also commonly used in FRP pipe and fittings for increased strength.

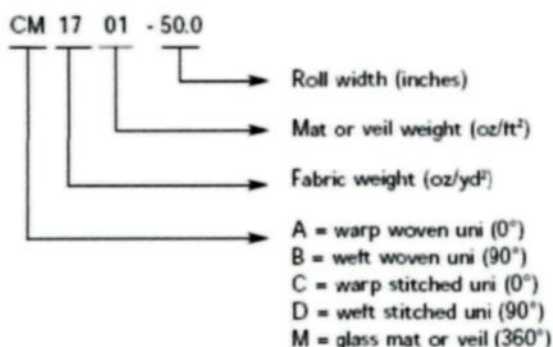
FEATURES

- MAXIMIZED AXIAL FIBER CONTENT
- IMPROVED LONGITUDINAL STRENGTH, STIFFNESS, AND FLEX
- ECONOMICAL METHOD TO DELIVER UNIDIRECTIONAL REINFORCEMENT
- IMPROVED STRENGTH WITHOUT ADDING THICKNESS AT COMPARABLE STIFFNESS
- AVAILABLE IN A VARIETY OF WIDTHS AND WEIGHTS

PRODUCT BENEFITS

- REDUCED RESIN USAGE AND PART WEIGHT
- FINISHED PARTS PERFORM UNDER EXTREME TENSILE AND FLEXURAL STRESS
- LOWER FINISHED PART COST
- ENHANCED PERFORMANCE FROM LIGHTER LAMINATES
- OFFERS DESIGN FLEXIBILITY FOR WIDE RANGE OF APPLICATIONS

PRODUCT NOMENCLATURE





OC® FABRICS OC® UNIDIRECTIONAL FABRICS (0° OR 90°)

PHYSICAL PROPERTIES / AVAILABLE PRODUCTS

FABRIC STYLE	TOTAL WEIGHT (OZ/YD²)	0°	90°	+45°	-45°	MAT	DRY THICKNESS (INCHES)
A130	13.1	12.8	0	0	0	0	0.023
A260	25.6	25.3	0	0	0	0	0.036
A280	28.2	27.8	0	0	0	0	0.035
CM1701	16.6	15.4	0	0	0	0.7	0.031
CM1708	24.0	15.4	0	0	0	7.6	0.041
D060	6.1	0	5.9	0	0	0	0.013
D075	7.5	0	7.4	0	0	0	TBD
D092	9.1	0	9.0	0	0	0	0.019
D155	15.5	0	15.4	0	0	0	0.021

SAMPLE MECHANICAL PROPERTIES

Sample Mechanical Properties of Laminate based on **A260**
(50% glass content by weight).

	ENGLISH UNITS	SI UNITS
Tensile (ASTM D 638)		
Strength	73.7 ksi	508 MPa
Modulus	3.51 msi	24.2 GPa
Compression (ASTM D 695)		
Strength	44.1 ksi	304 MPa
Modulus	2.80 msi	19.3 GPa
Flexural (ASTM D 790)		
Strength	109.3 ksi	753 MPa
Modulus	3.61 msi	24.9 GPa

Sample Mechanical Properties of Laminate based on **CM1701** (50% glass content by weight).

	ENGLISH UNITS	SI UNITS
Tensile (ASTM D 638)		
Strength	74.7 ksi	515 MPa
Modulus	4.20 msi	28.9 GPa
Compression (ASTM D 695)		
Strength	54.7 ksi	377 MPa
Modulus	3.39 msi	23.4 GPa
Flexural (ASTM D 790)		
Strength	102.6 ksi	707 MPa
Modulus	2.96 msi	20.4 GPa



INNOVATIONS FOR LIVING™

COMPOSITE SOLUTIONS



**OWENS CORNING
WORLD HEADQUARTERS**
ONE OWENS CORNING PARKWAY
TOLEDO, OHIO 43659
1.800.GET.PINK
www.owenscorning.com/composites

OWENS CORNING LATIN AMERICA
AV. DAS NAÇÕES UNIDAS, 17.891-30 AND
CEP - 04795-100
SÃO PAULO, BRAZIL
55.11.5514.7900

**EUROPEAN OWENS CORNING
FIBERGLAS S.A.**
CHAUSSÉE DE LA HULPE, 166
B-1170 BRUSSELS
BELGIUM
32.2.674.82.11

OWENS CORNING ASIAPACIFIC
HANCHI BUILDING 3F
1-2-9 SHIKAGOEN, MINATO-KU
TOKYO, 105-0011 - JAPAN
81.3.5733.1671

This information and data contained herein is offered solely as a guide in the selection of a reinforcement. The information contained in this publication is based on actual laboratory data and field test experience. We believe this information to be reliable, but do not guarantee its applicability to the user's process or assume any responsibility or liability arising out of its use or performance. The user agrees to be responsible for thoroughly testing any application to determine its suitability before committing to production. It is important for the user to determine the properties of its own commercial compounds when using this or any other reinforcement. Because of numerous factors affecting results, we make no warranty of any kind, express or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this data sheet shall not be construed as representations or warranties or as inducements to infringe any patent or violate any law, safety code or insurance regulation.



THE PINK PANTHER™ & © 1964-2003 Metro-Goldwyn-Mayer Studios Inc. All rights reserved. The color PINK is a registered trademark of Owens Corning.
Pub No. 57947-D October 2003 Copyright © 2003 Owens Corning Produced by mass communications


Annexe B : la soufflerie du LIMA


Laboratoire international
des matériaux antigivre

LIMA AMIL

Anti-icing Materials
International Laboratory





Soufflerie réfrigérée

Tunnel :	refrigéré avec recirculation en boucle fermée
Dimensions de la section d'essai :	0,6 m de haut 1,5 m de long 0,5 m de large
Températures d'opération :	-30°C à +25°C et jusqu'à -50°C avec azote liquide
Vitesse du vent :	jusqu'à 70 m/s
Alimentation électrique :	240 VAC 1ø 40 A 208 VAC 3ø 30 A
Ventilateur :	diamètre de 0,9 m et puissance de 50 hp à 3600 rpm
Acquisition de données : (16 canaux)	humidité relative température vitesse du vent pression atmosphérique

ESSAIS COURANTS

- Évaluation aérodynamique des fluides dégivants et antigivrants appliqués sur les avions au sol selon les procédures normalisées de l'Aerospace Material Specifications AMS 1424 et AMS 1428
- Étalonnage des tubes de Pitot et anémomètres à basses et hautes vitesses

Refrigerated Wind Tunnel

Tunnel :	refrigerated closed-loop
Test section dimensions :	0.6 m high 1.5 m long 0.5 m wide
Operating temperature range :	-30°C to +25°C and down to -50°C using liquid nitrogen
Wind speed:	up to 70 m/s
Available power :	240 VAC 1ø 40 A 208 VAC 3ø 30 A
Fan :	0.9 m diameter, 50 hp at 3600 rpm
Data acquisition : (16 channels)	relative humidity temperature wind speed atmospheric pressure

TYPICAL TESTS

- Aerodynamic acceptance testing of aircraft ground de-icing fluids according to Aerospace Material Specifications AMS 1424 and AMS 1428
- Pitot tubes and anemometer calibration at low and high speeds



Université du Québec à Chicoutimi
www.amil.chicoutimi.qc.ca

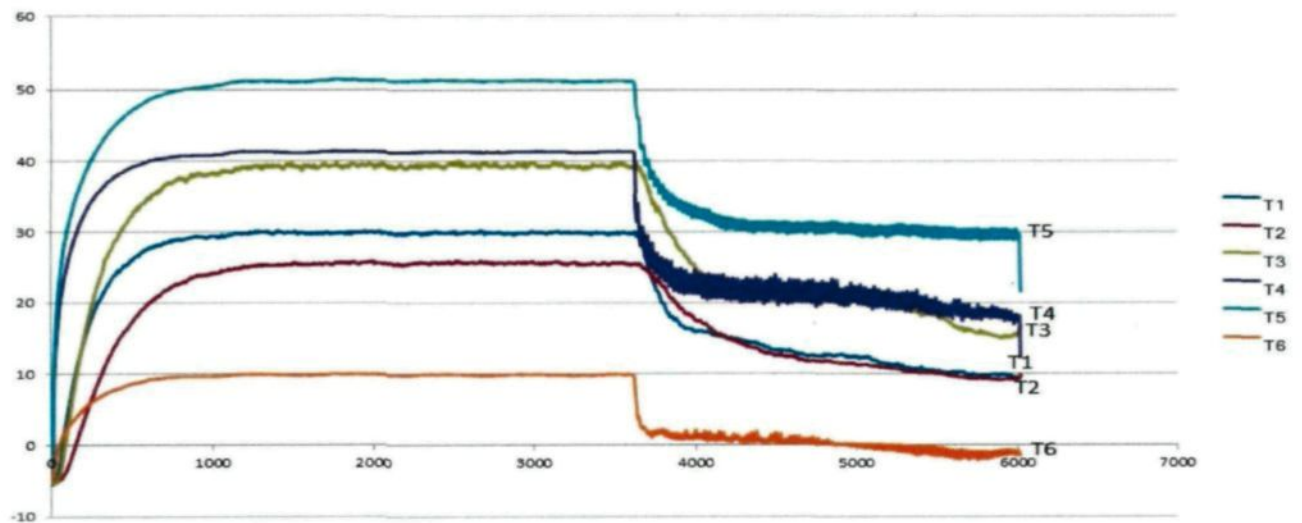
Annexe C : fiches d'essais

Essai n° 1

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
W0	21 m/s	-5,1°C	124,4 W	41,3°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm; conductivité thermique de la couche de fibre de verre : $1,3 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.

Nom de l'isolant : 0 mm; épaisseur de l'isolant : 0 mm; conductivité thermique de l'isolant : $0 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=25,9$				$T_2=12,3$			
$T_4=41,3$	$T_1=30,1$	11,2		$T_4=20,5$	$T_1=12,8$	7,7	
$T_5=51,7$	$T_3=39,3$		12,4	$T_5=30,2$	$T_3=19,9$		10,3
$T_6=10$				$T_6=-0,2$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,005}{1,3} = 0,0038 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{isolant} = \frac{\Delta x}{k} = 0 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{11,2 \text{ K} \cdot 0,0075 \text{ m}^2}{0,0038 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}} = 22,1 \text{ W}$$

$$= \frac{7,7 \text{ K} \cdot 0,0075 \text{ m}^2}{0,0038 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}} = 15,2 \text{ W}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{12,4 \text{ K} \cdot 0,015 \text{ m}^2}{0,0038 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}} = 48,9 \text{ W}$$

$$= \frac{10,3 \text{ K} \cdot 0,015 \text{ m}^2}{0,0038 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}} = 40,7 \text{ W}$$

$$E_{int} = 71 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

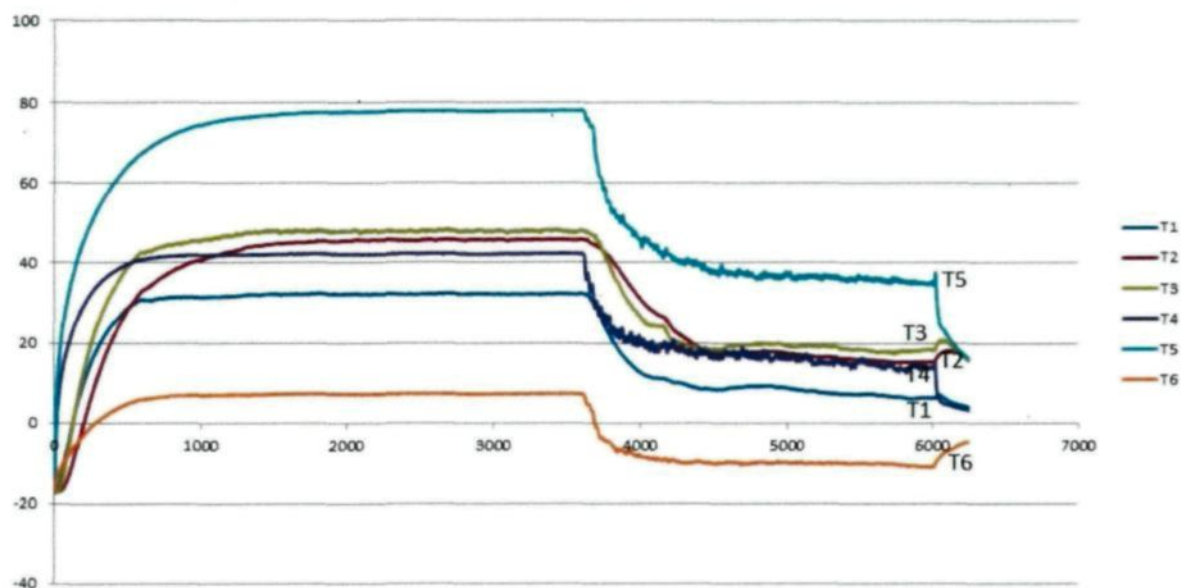
$$E_{int} = 55,9 \text{ W}$$

Essai n° 2

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
W0	21 m/s	-17,4°C	155 W	41,5°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm; conductivité thermique de la couche de fibre de verre : $1,3 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.

Nom de l'isolant : 0 mm; épaisseur de l'isolant : 0 mm; conductivité thermique de l'isolant : $0 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=45,2$				$T_2=16,9$			
$T_4=41,5$	$T_1=31,9$	9,6		$T_4=16,2$	$T_1=10,6$	5,6	
$T_5=78,3$	$T_3=47,6$		30,7	$T_5=37,1$	$T_3=19,2$		17,9
$T_6=8,4$				$T_6=-10,1$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,005}{1,3} = 0,0038 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{\text{isolant}} = \frac{\Delta x}{k} = 0 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{9,6 \text{ K} \cdot 0,0075 \text{ m}^2}{0,0038 \text{ K.m}^2/\text{W}} = 18,94 \text{ W}$$

$$= \frac{5,6 \text{ K} \cdot 0,0075 \text{ m}^2}{0,0038 \text{ K.m}^2/\text{W}} = 11,05 \text{ W}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{30,7 \text{ K} \cdot 0,015 \text{ m}^2}{0,0038 \text{ K.m}^2/\text{W}} = 121,1 \text{ W}$$

$$= \frac{17,9 \text{ K} \cdot 0,015 \text{ m}^2}{0,0038 \text{ K.m}^2/\text{W}} = 70,65 \text{ W}$$

$$E_{\text{int}} = 140,12 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

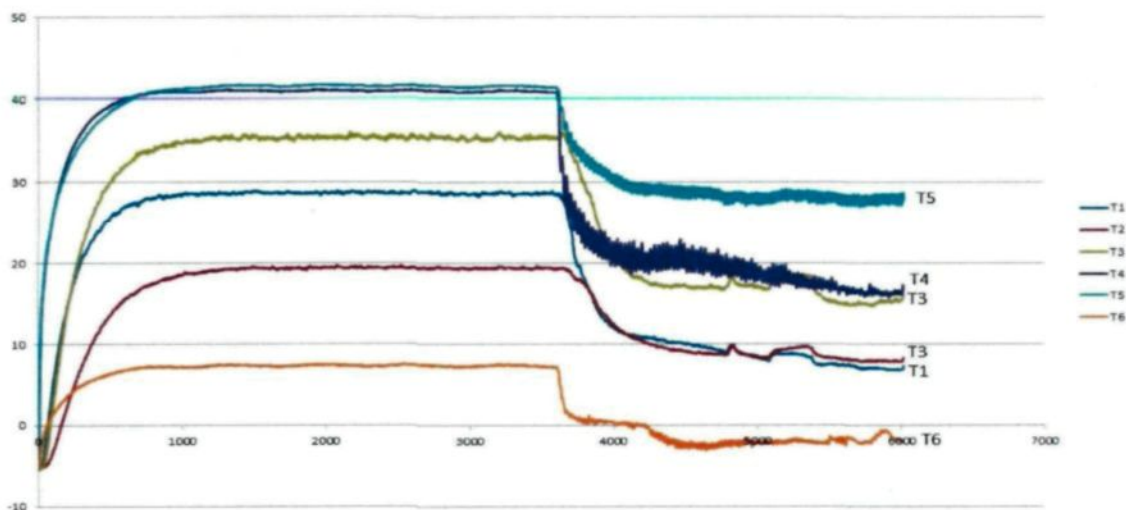
$$E_{\text{int}} = 81,7 \text{ W}$$

Essai n° 3

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
W0	33 m/s	-5,1°C	159,6 W	41,3°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm; conductivité thermique de la couche de fibre de verre : $1,3 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.

Nom de l'isolant : 0 m; épaisseur de l'isolant : 0 mm; conductivité thermique de l'isolant : 0 $\text{(W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=9,3$				$T_2=8,8$			
$T_4=41,5$	$T_1=28,7$	12,8		$T_4=18,1$	$T_1=8,3$	9,8	
$T_5=42,1$	$T_3=36,2$		5,9	$T_5=28,3$	$T_3=17,5$		10,8
$T_6=8,2$				$T_6=-3,6$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,005}{1,3} = 0,0038 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{\text{isolant}} = \frac{\Delta x}{k} = 0 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{12,8K \cdot 0,0075m^2}{0,0038K.m^2/W} = 25,26 \text{ W}$$

$$= \frac{9,8K \cdot 0,0075m^2}{0,0038K.m^2/W} = 19,34W$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{5,9K \cdot 0,015m^2}{0,0038K.m^2/W} = 23,28 \text{ W}$$

$$= \frac{10,8K \cdot 0,015m^2}{0,0038K.m^2/W} = 42,63W$$

$$E_{int} = 48,54 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

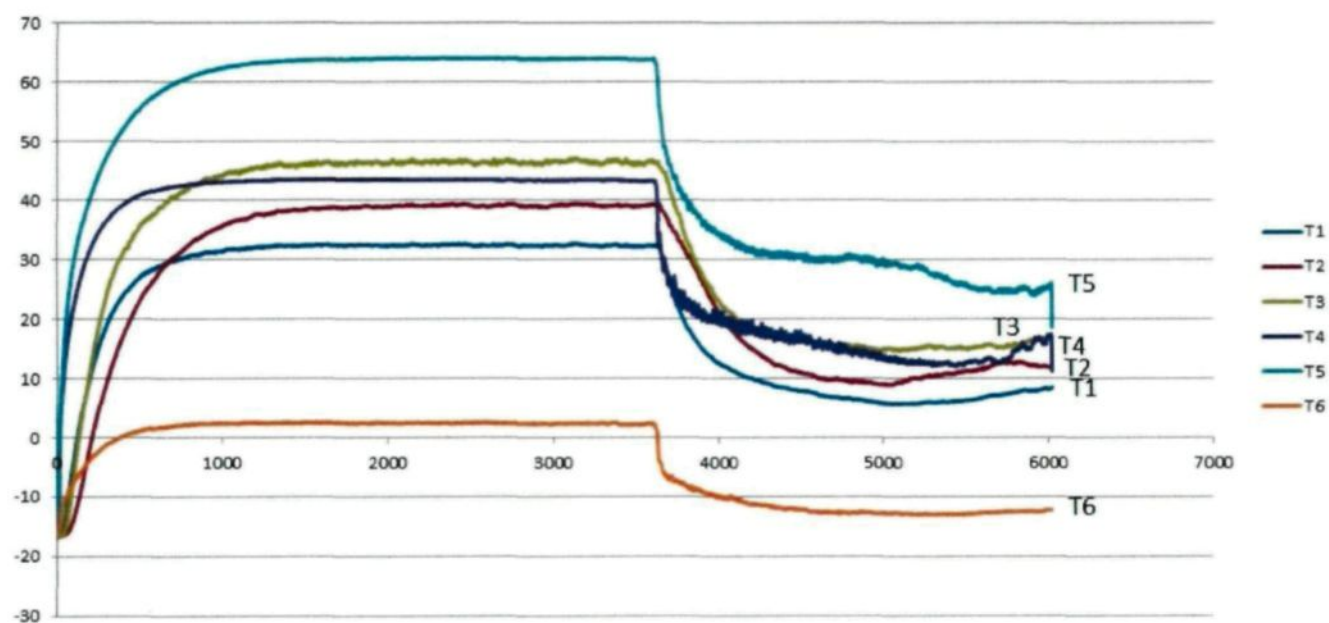
$$E_{int} = 61,97 \text{ W}$$

Essai n° 4

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
W0	33 m/s	-17,4°C	194,5 W	41,5°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm; conductivité thermique de la couche de fibre de verre : $1,3 \text{ (W.m}^{-1}.K^{-1})$.

Nom de l'isolant : 0 mm; épaisseur de l'isolant : 0 mm; conductivité thermique de l'isolant : 0 $(\text{W.m}^{-1}.K^{-1})$.



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=39,4$				$T_2=12,1$			
$T_4=41,5$	$T_1=32,3$	9,2		$T_4=16,1$	$T_1=8,4$	7,7	
$T_5=63,9$	$T_3=46,7$		17,2	$T_5=28,6$	$T_3=16,5$		12,1
$T_6=2,7$				$T_6=-13,3$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,005}{1,3} = 0,0038 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$$

$$R_{\text{isolant}} = \frac{\Delta x}{k} = 0 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{9,2 \text{ K} \cdot 0,0075 \text{ m}^2}{0,0038 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}} = 18,15 \text{ W}$$

$$= \frac{7,7 \text{ K} \cdot 0,0075 \text{ m}^2}{0,0038 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}} = 15,19 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{17,2 \text{ K} \cdot 0,015 \text{ m}^2}{0,0038 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}} = 67,89 \text{ W}$$

$$= \frac{12,1 \text{ K} \cdot 0,015 \text{ m}^2}{0,0038 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}} = 47,76 \text{ W}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

$$E_{\text{int}} = 86 \text{ W}$$

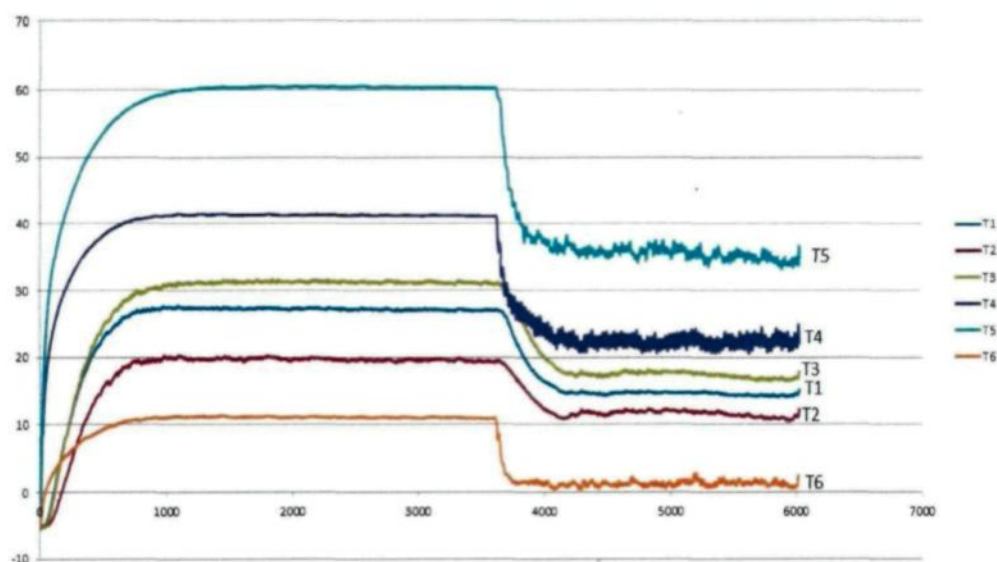
$$E_{\text{int}} = 62,95 \text{ W}$$

Essai n° 5

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
PL	21 m/s	-5,1°C	123 W	41,2°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm; conductivité thermique de la couche de fibre de verre : $1,3 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.

Nom de l'isolant : polyéthylène; épaisseur de l'isolant : 1 mm; conductivité thermique de l'isolant : $0,37 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=20$				$T_2=12$			
$T_4=41,2$	$T_1=28,1$	13,1		$T_4=22,2$	$T_1=14,5$	7,7	
$T_5=60,4$	$T_3=31,4$		29	$T_5=35,2$	$T_3=17,6$		17,6
$T_6=11,2$				$T_6=1,1$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,005}{1,3} = 0,0038 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{isolant} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,001}{0,37} = 0,0027 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} = \frac{13,1K \cdot 0,0075m^2}{0,0065K.m^2/W} = 15,11 \text{ W}$$

$$= \frac{7,7K \cdot 0,0075m^2}{0,0065K.m^2/W} = 8,88 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} = \frac{29K \cdot 0,015m^2}{0,0065K.m^2/W} = 66,92 \text{ W}$$

$$= \frac{17,6K \cdot 0,015m^2}{0,0065K.m^2/W} = 40,61 \text{ W}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}}$$

$$E_{int} = 82,03 \text{ W}$$

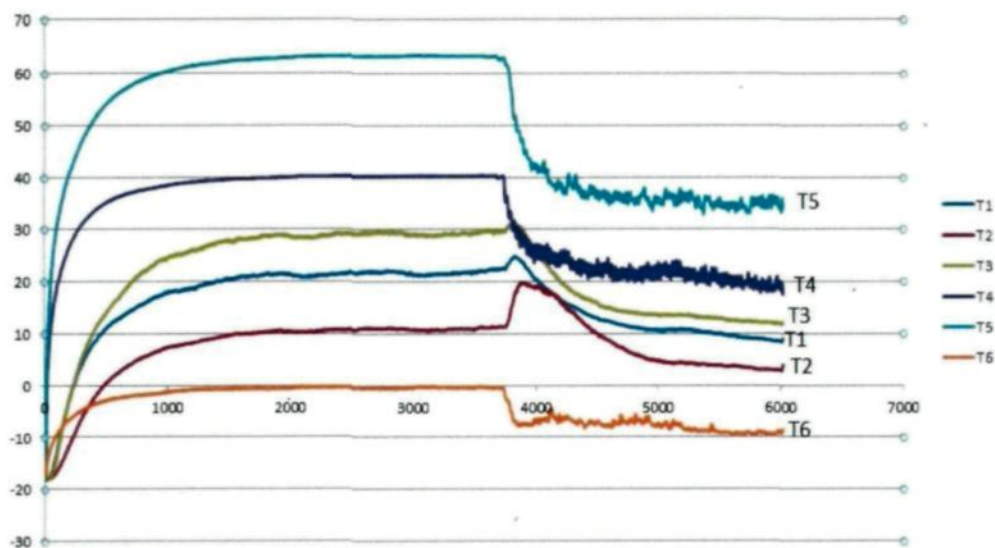
$$E_{int} = 49,49 \text{ W}$$

Essai n° 6

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
PL	21 m/s	-17°C	153,5 W	40,3°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm; conductivité thermique de la couche de fibre de verre : $1,3 \text{ (W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$.

Nom de l'isolant : polyéthylène; épaisseur de l'isolant : 1 mm; conductivité thermique de l'isolant : $0,37 \text{ (W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$.



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=11,6$				$T_2=4,7$			
$T_4=40,3$	$T_1=22,2$	18,1		$T_4=21,1$	$T_1=10,3$	10,8	
$T_5=63,6$	$T_3=29,1$		34,5	$T_5=46,5$	$T_3=14,3$		32,2
$T_6=0$				$T_6=-8,3$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,005}{1,3} = 0,0038 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{isolant} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,001}{0,37} = 0,0027 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} = \frac{18,1K \cdot 0,0075m^2}{0,0065K.m^2/W} = 20,88 \text{ W}$$

$$= \frac{10,8K \cdot 0,0075m^2}{0,0065K.m^2/W} = 12,46 \text{ W}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} = \frac{34,5K \cdot 0,015m^2}{0,0065K.m^2/W} = 79,61 \text{ W}$$

$$= \frac{32,2K \cdot 0,015m^2}{0,0065K.m^2/W} = 74,3 \text{ W}$$

$$E_{int} = 100,49 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}}$$

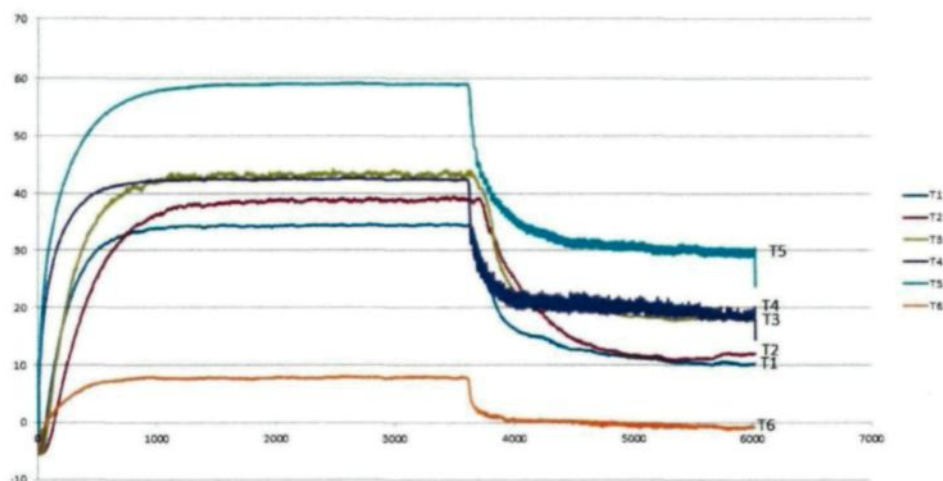
$$E_{int} = 86,76 \text{ W}$$

Essai n° 7

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
PL	33m/s	-5,1°C	152,2W	42,3°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm; conductivité thermique de la couche de fibre de verre : $1,3 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.

Nom de l'isolant : polyéthylène; épaisseur de l'isolant : 1 mm; conductivité thermique de l'isolant : $0,37 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=38,7$				$T_2=12$			
$T_4=42,3$	$T_1=34,1$	8,2		$T_4=20,3$	$T_1=11,2$	9,1	
$T_5=58,8$	$T_3=43$		15,8	$T_5=30,2$	$T_3=19,2$		11
$T_6=8,1$				$T_6=-0,5$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,005}{1,3} = 0,0038 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{\text{isolant}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,001}{0,37} = 0,0027 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{8,2K \cdot 0,0076m^2}{0,0065K.m^2/W} = 9,58W$$

$$= \frac{9,1K \cdot 0,0075m^2}{0,0065K.m^2/W} = 10,5W$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{15,8K \cdot 0,015m^2}{0,0065K.m^2/W} = 36,46W$$

$$= \frac{11K \cdot 0,015m^2}{0,0065K.m^2/W} = 25,38W$$

$$E_{\text{int}} = 46,04 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

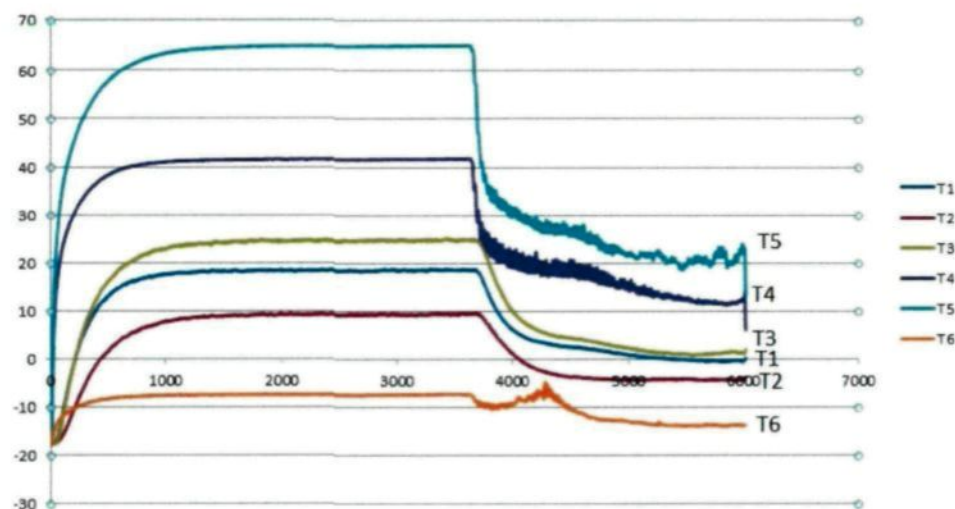
$$E_{\text{int}} = 35,88 \text{ W}$$

Essai n° 8

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
PL	33 m/s	-17,4°C	187,3 W	41,7°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm; conductivité thermique de la couche de fibre de verre : 1,3 ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Nom de l'isolant : polyéthylène; épaisseur de l'isolant : 1 mm; conductivité thermique de l'isolant : 0,37 ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=9,7$				$T_2=26,2$			
$T_4=41,7$	$T_1=18,6$	23,1		$T_4=15,4$	$T_1=1,3$	14,1	
$T_5=24,9$	$T_3=25,1$		0,2	$T_5=25,1$	$T_3=26,8$		1,7
$T_6=-8,3$				$T_6=-17,2$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,005}{1,3} = 0,0038 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{isolant} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,001}{0,37} = 0,0027 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} = \frac{23,1K \cdot 0,0075m^2}{0,0065K.m^2/W} = 40,51W$$

$$= \frac{14,1K \cdot 0,0075m^2}{0,0065K.m^2/W} = 16,26W$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} = \frac{0,2K \cdot 0,015m^2}{0,0065K.m^2/W} = 4,61W$$

$$= \frac{1,7K \cdot 0,015m^2}{0,0065K.m^2/W} = 3,92 \text{ W}$$

$$E_{int} = 45,12 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}}$$

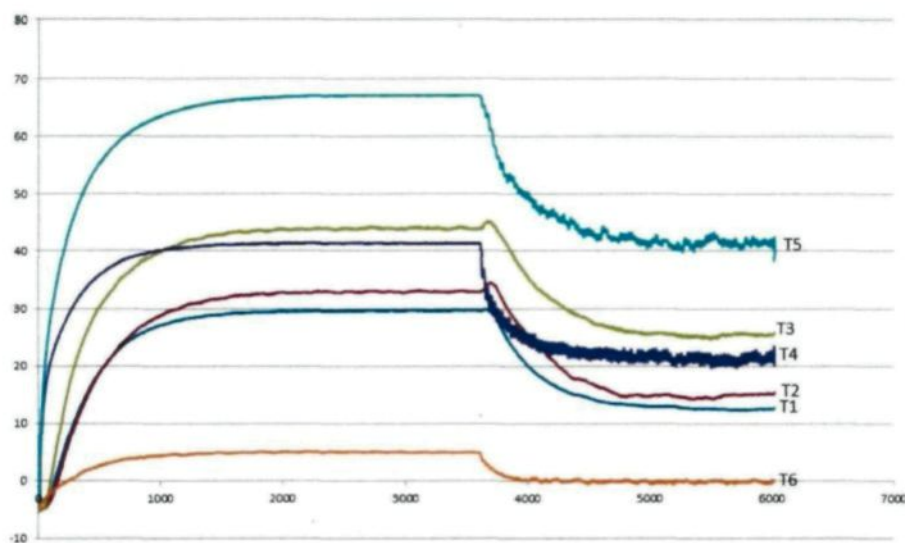
$$E_{int} = 20,18 \text{ W}$$

Essai n° 9

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
Tf	21 m/s	-5,1°C	131,2 W	41,4°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm; conductivité thermique de la couche de fibre de verre : $1,3 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.

Nom de l'isolant : téflon; épaisseur de l'isolant : 1,2 mm; conductivité thermique de l'isolant : $0,25 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=33,7$				$T_2=14,8$			
$T_4=41,4$	$T_1=30$	11,4		$T_4=21,3$	$T_1=13,1$	8,2	
$T_5=68,2$	$T_3=44$		24,2	$T_5=41,2$	$T_3=26,4$		14,8
$T_6=5,2$				$T_6=0$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,005}{1,3} = 0,0038 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{isolant} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,0012}{0,25} = 0,0048 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} = \frac{11,4\text{K} \cdot 0,0075\text{m}^2}{0,0086\text{K.m}^2/\text{W}} = 9,94 \text{ W}$$

$$= \frac{8,2\text{K} \cdot 0,0075\text{m}^2}{0,0086\text{K.m}^2/\text{W}} = 7,15 \text{ W}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} = \frac{24,2\text{K} \cdot 0,015\text{m}^2}{0,0086\text{K.m}^2/\text{W}} = 42,2 \text{ W}$$

$$= \frac{14,8\text{K} \cdot 0,015\text{m}^2}{0,0086\text{K.m}^2/\text{W}} = 25,81 \text{ W}$$

$$E_{int} = 52,14 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}}$$

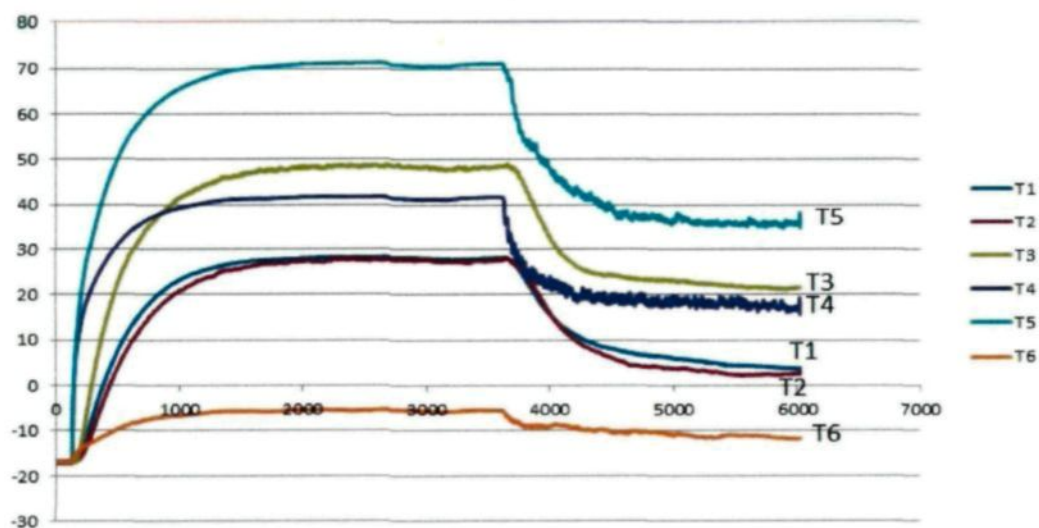
$$E_{int} = 32,96 \text{ W}$$

Essai n° 10

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
Tf	21 m/s	-17,1°C	162,6 W	42,3°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm; conductivité de la couche de fibre de verre : 1,3 ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Nom de l'isolant : téflon; épaisseur de l'isolant : 1,2 mm; conductivité thermique de l'isolant : 0,25 ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=28,1$				$T_2=13,8$			
$T_4=42,3$	$T_1=28,5$	13,8		$T_4=19,1$	$T_1=16,8$	2,3	
$T_5=70,7$	$T_3=48,9$		21,8	$T_5=36,8$	$T_3=13,8$		23
$T_6=-4,9$				$T_6=-10,5$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,005}{1,3} = 0,0038 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{\text{isolant}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,0015}{0,25} = 0,0048 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{13,8\text{K} \cdot 0,0075\text{m}^2}{0,0086\text{K.m}^2/\text{W}} = 12,03 \text{ W}$$

$$= \frac{2,3\text{K} \cdot 0,0075\text{m}^2}{0,0086\text{K.m}^2/\text{W}} = 2 \text{ W}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{21,8\text{K} \cdot 0,015\text{m}^2}{0,0086\text{K.m}^2/\text{W}} = 38,02 \text{ W}$$

$$= \frac{23\text{K} \cdot 0,015\text{m}^2}{0,0086\text{K.m}^2/\text{W}} = 40,11 \text{ W}$$

$$E_{\text{int}} = 50,05 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

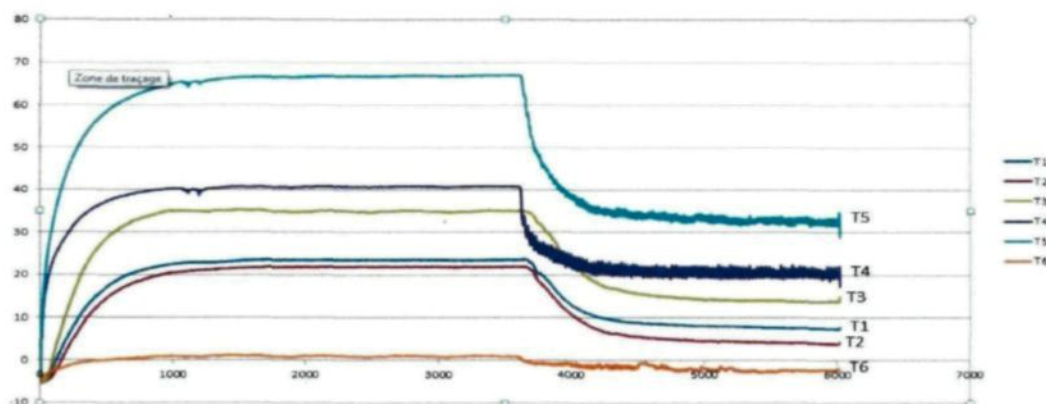
$$E_{\text{int}} = 42,11 \text{ W}$$

Essai n° 11

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
Tf	33 m/s	-5,1°C	161,2 W	41,1°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm; conductivité thermique de la couche de fibre de verre : $1,3 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.

Nom de l'isolant : téflon; épaisseur de l'isolant : 1,2 mm; conductivité thermique de l'isolant : $0,25 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=22,2$				$T_2=4,7$			
$T_4=41,1$	$T_1=23,8$	17,3		$T_4=21,2$	$T_1=8,2$	13	
$T_5=67,6$	$T_3=25,1$		42,5	$T_5=33,8$	$T_3=14,2$		19,6
$T_6=1,2$				$T_6=-2,3$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,005}{1,3} = 0,0038 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{isolant} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,0012}{0,25} = 0,0048 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} = \frac{17,3K \cdot 0,0075m^2}{0,0086K.m^2/W} = 15,08 \text{ W}$$

$$= \frac{13K \cdot 0,0075m^2}{0,0086K.m^2/W} = 11,33 \text{ W}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} = \frac{42,5K \cdot 0,015m^2}{0,0086K.m^2/W} = 74,12 \text{ W}$$

$$= \frac{19,6K \cdot 0,015m^2}{0,0086K.m^2/W} = 34,18 \text{ W}$$

$$E_{int} = 89,2 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}}$$

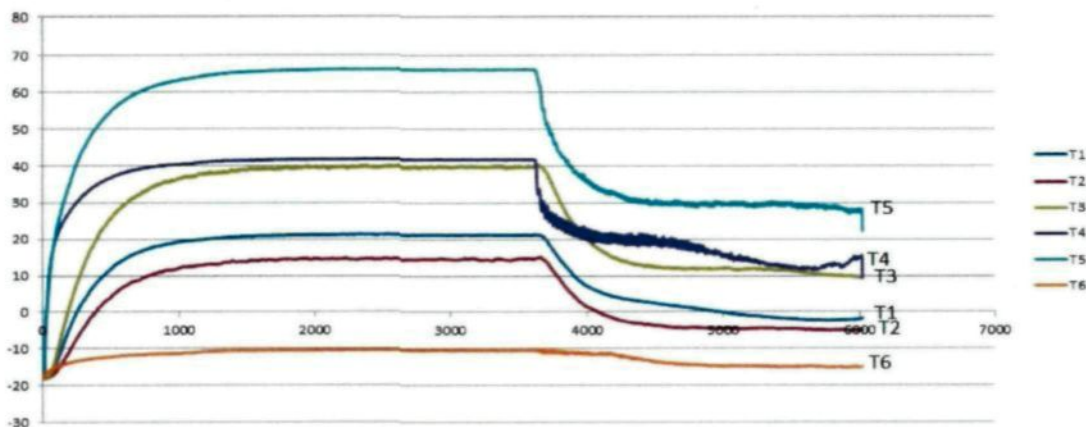
$$E_{int} = 45,51 \text{ W}$$

Essai N° 12

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
Tf	33 m/s	-17,1°C	203,8 W	42,3°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm; conductivité de la couche de fibre de verre : 1,3 ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Nom de l'isolant : téflon; épaisseur de l'isolant : 1,2 mm; conductivité thermique de l'isolant : 0,25 ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=14,8$				$T_2=-4,8$			
$T_4=42,3$	$T_1=20,8$	21,5		$T_4=17,5$	$T_1=0$	17,5	
$T_5=67,8$	$T_3=40$		27,8	$T_5=30$	$T_3=12,1$		17,9
$T_6=-10$				$T_6=-14,3$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,005}{1,3} = 0,0038 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{\text{isolant}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,0012}{0,25} = 0,0048 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{21,5K \cdot 0,0075m^2}{0,0086K.m^2/W} = 18,75 \text{ W}$$

$$= \frac{17,5K \cdot 0,0075m^2}{0,0086K.m^2/W} = 15,26 \text{ W}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{27,8K \cdot 0,015m^2}{0,0086K.m^2/W} = 48,48W$$

$$= \frac{17,9K \cdot 0,015m^2}{0,0086K.m^2/W} = 31,22 \text{ W}$$

$$E_{\text{int}} = 67,23 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I \cdot A}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

$$E_{\text{int}} = 46,48 \text{ W}$$

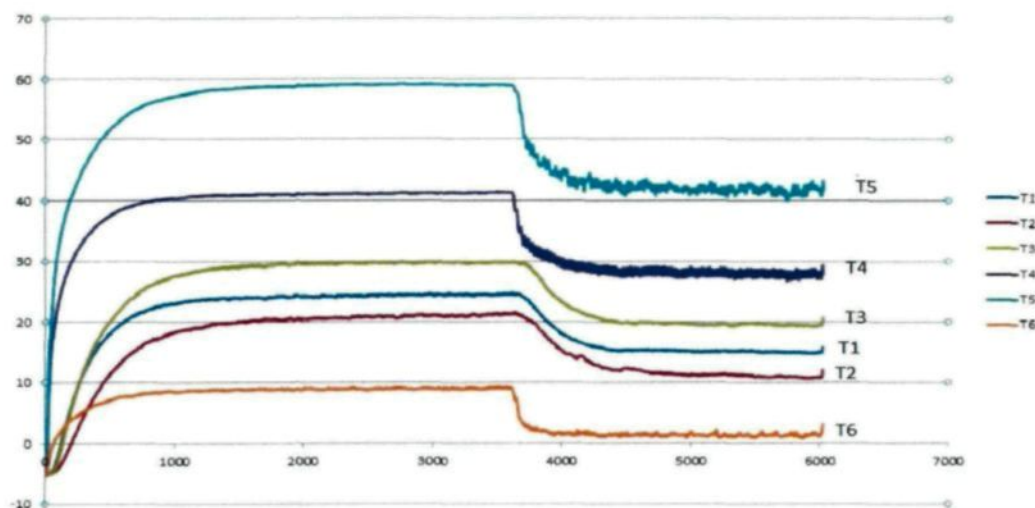
Essai n° 13

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
Hy	21 m/s	-4,8°C	122,4 W	41,3°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm; conductivité thermique de la couche de fibre de verre : $1,3 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.

Nom de l'isolant : polyéthylène; épaisseur de l'isolant : 1 mm; conductivité thermique de l'isolant : $0,37 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.

Couche de peinture hydrophobe : 0,4 mm ; conductivité thermique de la couche hydrophobe : $0,17 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=21,1$				$T_2=11,3$			
$T_4=41,3$	$T_1=15$	26,3		$T_4=28,1$	$T_1=15$	13,1	
$T_5=59$	$T_3=19,5$		39,5	$T_5=42$	$T_3=19,5$		22,5
$T_6=9$				$T_6=2,1$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,0005}{1,3} = 0,0038 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{isolant} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,001}{0,37} = 0,0027 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{peinture} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,00004}{0,17} = 0,0002 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} = \frac{26,3 * 0,0075 \text{ m}^2}{0,0067 \text{ K.m}^2/\text{W}} = 29,44 \text{ W}$$

$$\frac{13,1 * 0,0075 \text{ m}^2}{0,0067 \text{ K.m}^2/\text{W}} = 14,66 \text{ W}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} = \frac{39,5 * 0,015 \text{ m}^2}{0,0067 \text{ K.m}^2/\text{W}} = 88,43 \text{ W}$$

$$\frac{22,5 * 0,015 \text{ m}^2}{0,0067 \text{ K.m}^2/\text{W}} = 50,37 \text{ W}$$

$$E_{int} = 117,87 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} =$$

$$E_{int} = 65,03 \text{ W}$$

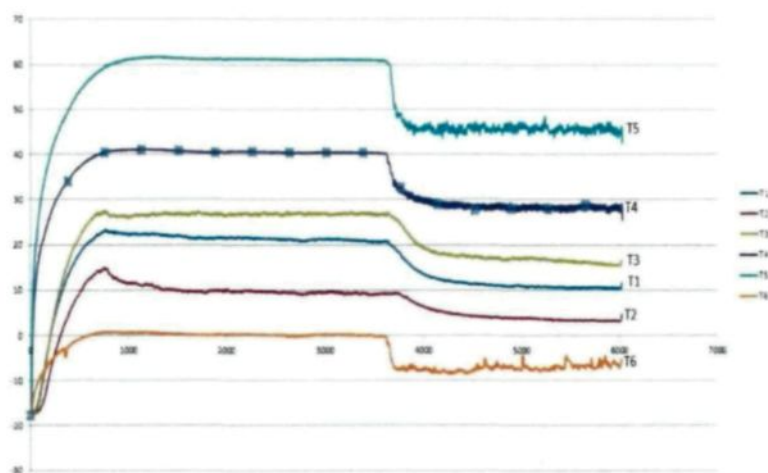
Essai N° 14

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
Hy	21 m/s	-17,1°C	152 W	42,3°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm; conductivité thermique de la couche de fibre de verre : $1,3 \text{ (W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$.

Nom de l'isolant : polyéthylène; épaisseur de l'isolant : 1 mm; conductivité thermique de l'isolant : $0,37 \text{ (W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$.

Couche de peinture hydrophobe : 0,4 mm; conductivité thermique de la couche hydrophobe : $0,17 \text{ (W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$.



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=9,9$				$T_2=4,8$			
$T_4=40,5$	$T_1=21,3$	19,2		$T_4=29,1$	$T_1=10,5$	18,6	
$T_5=61,1$	$T_3=27,6$		33,5	$T_5=46,8$	$T_3=17,8$		29
$T_6=0$				$T_6=-8,3$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,0005}{1,3} = 0,0038 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{isolant} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,001}{0,37} = 0,0028 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{peinture} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,00004}{0,17} = 0,0002 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} = \frac{19,2K * 0,0075m^2}{0,0067K.m^2/W} = 21,49 \text{ W}$$

$$\frac{18,6K * 0,0075m^2}{0,0067K.m^2/W} = 20,82 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} = \frac{33,5K * 0,015m^2}{0,0067K.m^2/W} = 75 \text{ W}$$

$$\frac{29K * 0,015m^2}{0,0067K.m^2/W} = 64,92 \text{ W}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I}{R_{Fibre\ de\ verre} + R_{isolant}} =$$

$$E_{int} = 96,49 \text{ W}$$

$$E_{int} = 85,74 \text{ W}$$

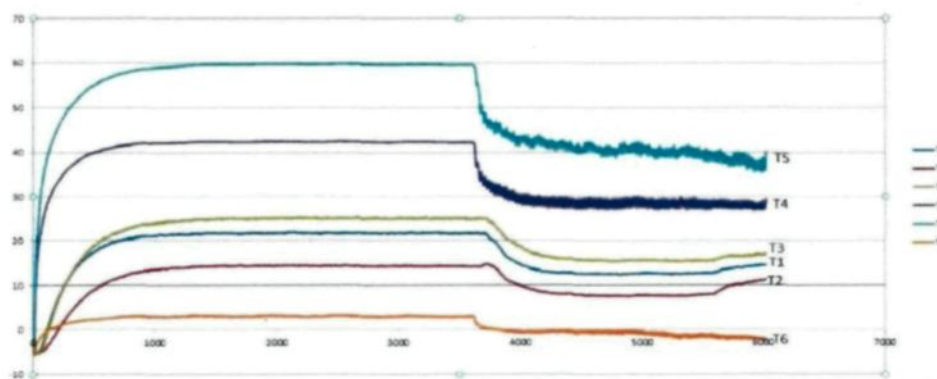
Essai n° 15

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
Hy	33 m/s	-4,9°C	152,5 W	41,3°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm; conductivité thermique de la fibre de verre : 1,3 ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Nom de l'isolant : polyéthylène; épaisseur de l'isolant : 1 mm; conductivité thermique de l'isolant : 0,37 ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Couche de peinture hydrophobe : 0,4 mm; conductivité thermique de la couche hydrophobe : 0,17 ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=21,1$				$T_2=11,3$			
$T_4=41,3$	$T_1=24,6$	16,7		$T_4=28,1$	$T_1=15$	13,1	
$T_5=59$	$T_3=30$		29	$T_5=42$	$T_3=19,5$		22,5
$T_6=9$				$T_6=2,1$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,0005}{1,3} = 0,0038 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{\text{isolant}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,001}{0,37} = 0,0027 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$R_{\text{peinture}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,00004}{0,17} = 0,0002 \text{ K. m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{16,7K * 0,0075m^2}{0,0067K.m^2/W} = 18,69 \text{ W}$$

$$\frac{13,1K * 0,0075m^2}{0,0067K.m^2/W} = 14,66 \text{ W}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{29K * 0,015m^2}{0,0067K.m^2/W} = 64,92W$$

$$\frac{22,5K * 0,015m^2}{0,0067K.m^2/W} = 50,37W$$

$$E_{int} = 83,61 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} =$$

$$E_{int} = 65,03 \text{ W}$$

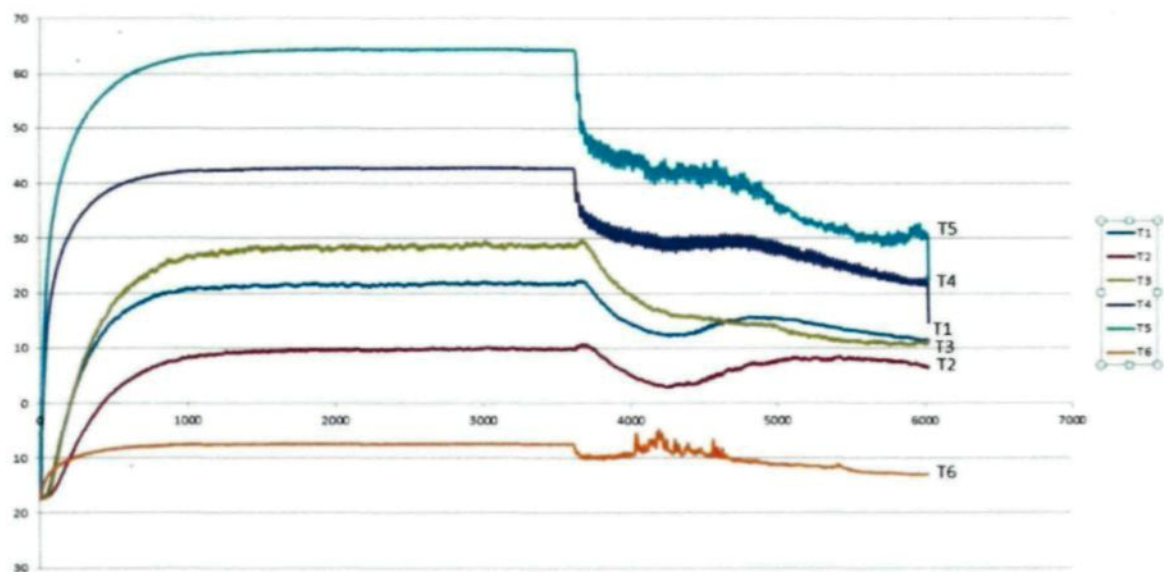
Essai n° 16

Profil	Vsouff	Tsouff	Puissance	T4
Hy	33 m/s	-17°C	186,4 W	42°C

Épaisseur de la couche de fibre de verre : 5 mm ; conductivité thermique de la couche de fibre de verre : $1,3(\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.

Nom de l'isolant : polyéthylène; épaisseur de l'isolant : 1 mm; conductivité thermique de l'isolant : $0,37(\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.

Couche de peinture hydrophobe : 0,4 mm; conductivité thermique de la couche hydrophobe : $0,17(\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$.



Moyenne du chauffage à l'équilibre sans givrage en degrés C.		ΔT_E	ΔT_I	Moyenne du chauffage à l'équilibre avec givrage en degrés C.		ΔT_E	ΔT_I
$T_2=10$				$T_2=8,1$			
$T_4=42$	$T_1=22,1$	19,9		$T_4=28,1$	$T_1=15,2$	12,9	
$T_5=64,7$	$T_3=28,9$		35,8	$T_5=38,1$	$T_3=13,4$		24,7
$T_6=12$				$T_6=-10,9$			

$$R_{\text{Fibre de verre}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,0005}{1,3} = 0,0038 \text{ K.m}^2/\text{W}$$

$$R_{\text{isolant}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,001}{0,37} = 0,0027 \text{ K.m}^2/\text{W}$$

$$R_{\text{peinture}} = \frac{\Delta x}{k} = \frac{0,00004}{0,17} = 0,0002 \text{ K.m}^2/\text{W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{19,9\text{K} \cdot 0,0075\text{m}^2}{0,0067\text{K.m}^2/\text{W}} = 22,27 \text{ W}$$

$$= \frac{12,9\text{K} \cdot 0,0075\text{m}^2}{0,0067\text{K.m}^2/\text{W}} = 14,44 \text{ W}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} = \frac{35,8\text{K} \cdot 0,015\text{m}^2}{0,0067\text{K.m}^2/\text{W}} = 80,14\text{W}$$

$$\frac{24,7\text{K} \cdot 0,015\text{m}^2}{0,0067\text{K.m}^2/\text{W}} = 55,29 \text{ W}$$

$$E_{\text{int}} = 102,41 \text{ W}$$

$$F_E = \frac{\Delta T_E}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}}$$

$$F_I = \frac{\Delta T_I}{R_{\text{Fibre de verre}} + R_{\text{isolant}}} =$$

$$E_{\text{int}} = 69,73 \text{ W}$$